

SCIENCES ET TECHNIQUES INDUSTRIELLES

Durée : 6 heures.

Aucun document n'est autorisé.

Composition du sujet :

- Le texte du sujet : 23 pages.
- Les annexes : 13 pages.
- Les documents réponses : 2 pages.

Conseils aux candidats :

Ce sujet comporte deux parties indépendantes, à l'intérieur de chaque partie les différentes études sont indépendantes.

Les candidats sont priés de rédiger sur des feuilles séparées les sept études qui composent ce sujet. Il leur est rappelé qu'ils doivent séparer et repérer clairement les questions, utiliser les notations indiquées dans le texte ou sur les figures, présenter clairement les calculs, dégager et encadrer les résultats relatifs à chaque question référencée dans le sujet.

Les documents réponses (même non utilisés) doivent être impérativement remis avec les copies.

**EQUIPEMENT « GELIFIEUSE-GRANULATRICE »
destiné à la production de PVC.**

PREMIERE PARTIE :

ETUDE DE LA GELIFIEUSE GRANULATRICE

Barème

Etude A : Granulatrice, entraînement et comportement thermique.	7
Etude B : Gélifieuse, principe de la commande vectorielle	8
Etude C : Gélifieuse, asservissement de température.	5

DEUXIEME PARTIE :

**ETUDE DE L'ALIMENTATION ELECTRIQUE
DE LA GRANULATRICE.**

Etude D : Sélectivité.	4
Etude E : Concept de sûreté de fonctionnement des protections.	7
Etude F : Maîtrise des chutes de tension.	6
Etude G : Vérification de la tenue thermique du câble.	3

EQUIPEMENT « GELIFIEUSE-GRANULATRICE » destiné à la production de PVC.

PRESENTATION DU CONTEXTE DES ETUDES.

Les études proposées portent sur un équipement de l'usine Solvay à Tavaux (Jura), nommé «gélifieuse-granulatrice», il est destiné à la production de polychlorure de vinyle (PVC).

La poudre de PVC pur ne peut être mise en œuvre directement, car elle est instable sous les effets de la chaleur et de la lumière. Il est nécessaire de l'amener à un état convenable pour la transformation par un apport de divers additifs. (Plastifiants, Charges, Stabilisants, Lubrifiants, Pigments ou colorants, Agents de mise en œuvre, etc...)

La préparation du PVC consiste à fabriquer un semi-produit sous forme de granulés en partant des poudres.

La machine de granulation proposée dans cette étude est une Kombiplast de la marque Werner & Pfleiderer (ANNEXE P1).

Elle se compose de deux étages :

- ♦ un malaxeur double-vis type ZSK à vitesse rapide,
- ♦ une monovis de granulation tournant lentement du type ES-A.

Le prémélange arrive aux double-vis par gravité à partir d'un doseur, où il est forcé directement par une vis gavageuse. Le produit traverse La ZSK, qui contribue à l'homogénéisation et la gélification du matériau avant de le transférer à la monovis ES-A, celle ci porte le degré de gélification à la valeur souhaitée et pousse le produit à travers la filière pour la granulation.

Différents aspects de cette machine, dimensionnement de la motorisation de la granulatrice, comportement thermique, principe de la commande du moteur de gélification, et asservissement de température pendant la gélification font l'objet des études de la première partie.

Le complexe de fabrication dispose de deux sources d'alimentation, l'une à partir de deux postes d'arrivée connectés au réseau EDF sous 220 kV, et l'autre à partir d'une centrale d'autoproduction (voir annexe P-2).

Dix turboalternateurs fournissent sous 6 kV une puissance variant entre 20 et 85 MW. Trois transformateurs (un transformateur 220/17,5 kV de 60 ou 92 MVA et deux transformateurs 220/30 kV de 70 et 100 MVA) équipent chaque poste d'arrivée.

Le réseau interne de l'usine de Tavaux retient l'organisation suivante :

- ♦ un réseau de transport en 30 kV,
- ♦ une interconnexion entre les postes 30 kV,
- ♦ cinq réseaux de distribution en 6 kV,
- ♦ des réseaux basse tension, 400 ou 690 V,
- ♦ un poste centralisé de contrôle (dispatching).
- ♦ une séparation des départs BT en trois niveaux,
- ♦ les départs non vitaux, les départs vitaux, et les départs de secours.

La puissance disponible sur le site est de 190 MW, répartie en 130 MW pour les besoins de l'électrolyse et 60 MW pour les besoins de la force motrice.

La force motrice est essentiellement composée de moteurs asynchrones à cage à démarrage direct et de quelques moteurs asynchrones ou synchrones équipés de variateurs de fréquence.

Les moteurs de puissance supérieure à 400 kW sont alimentés sous une tension de 6 kV, ceux de puissance inférieure sous 400 ou 690 V.

Des défauts à l'origine bénins, dégénéralant en défauts graves, ont conduit cette entreprise à mettre en œuvre un grand projet de restructuration du réseau électrique centré sur la mise en œuvre d'un système de protection plus performant.

Dans ce cadre de nombreuses investigations sont lancées, et parmi lesquelles, les études de la sélectivité des protections, de la mise en œuvre d'un concept de sûreté et du démarrage des moteurs feront l'objet de la seconde partie.

PREMIERE PARTIE

ETUDE DE LA GELIFIEUSE GRANULATRICE

Etude A Granulatrice

Le mélange, issu de la gélifieuse (double-vis ZSK 133) à l'état fluide, tombe par gravitation dans l'extrudeuse. Il est entraîné par la monovis ES-A qui termine la gélification (ANNEXE A-1). L'écoulement est considéré comme laminaire, en hélice autour de la monovis qui tourne à la vitesse de 50 tr/mn. A la sortie de la vis, un bouchon de matière se forme à la pression de 60 bars ; le produit est alors poussé à travers une filière de 1556 trous. Un couteau racleur coupe les joncs et les granulés obtenus sont refroidis avant d'être conditionnés.

A . 1 . Dimensionnement de l'entraînement de la vis de granulation

A.1.1. Energie potentielle de pression

Question 1 : *montrer que l'énergie nécessaire pour porter un kilogramme de matière de la pression P_a à la pression P_m est de la forme $\frac{P_m - P_a}{\rho}$ où ρ est la masse volumique du produit. (exprimer le travail d'une force de pression sur un kilogramme de matière)*

A.1.2. bilan énergétique

Il nécessite une étude utilisant la mécanique des fluides et en particulier l'équation de Bernouilli. Les éléments essentiels de cette théorie sont rappelés dans l'ANNEXE A-4. Tous les calculs seront effectués pour le débit maximum de la machine.

Question 2 : *calculer la variation d'énergie de pression.*

- Pression entrée : pression atmosphérique
- pression à l'extrémité de la vis : 60 bars
- masse volumique du PVC : $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$
- débit maximum de la granulatrice : 8 tonnes/heure

Question 3 : *expliquer pourquoi la variation d'énergie de pesanteur est nulle dans l'extrudeuse.*

Question 4 : pertes de charges systématiques

L'écoulement de la veine fluide de PVC, de section rectangulaire, en hélice autour de la vis, (ANNEXE A-2 et A-3), sera assimilé à un écoulement laminaire dans une conduite rectiligne cylindrique de diamètre d_i et de longueur l_i .

Calculer les paramètres de cette conduite équivalente (section, diamètre, longueur) en considérant la section rectangulaire, puis appliquer la formule de Weisbach.

- viscosité cinématique du PVC $\nu = 83,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

- vitesse de rotation de la vis $N = 50 \text{ tr/mn}$
- Longueur de la vis $L = 2 \text{ m}$

Question 5 : calculer la variation d'énergie cinétique entre les deux extrémités de la vis.

Question 6 : pertes de charges singulières

La filière de granulation comporte 1556 trous de 3 millimètres de diamètre. Un coupeur racleur tronçonne les joncs de PVC sortant de la filière et les granulés sont immédiatement refroidis (lit fluidisé) afin d'obtenir les granulés solides.

Calculez la vitesse des joncs de PVC en sortie de filière.

Dans un but de simplification, le calcul des pertes de charge singulière n'est pas demandé ; elles représentent 70% de l'énergie totale délivrée par le moteur de la vis.

Question 7 : calculer la puissance nécessaire à l'entraînement de la vis et le couple exercé sur celle-ci dans les conditions de débit maximum.

A.2 Comportement thermique de la granulatrice

Les pertes de charges dues à l'écoulement du PVC (frottements, turbulences) provoquent un échauffement important de la matière. Celui-ci doit être maîtrisé afin de ne pas rompre les chaînes moléculaires du PVC.

Cette étude propose une modélisation thermique (ANNEXE A-5) du système Vis, cylindre, PVC afin de calculer l'élévation de température du PVC.

notations et valeurs :

- $T_v = 90^\circ\text{C}$ température de la vis,
- $T_c = 100^\circ\text{C}$ température du cylindre,
- $T_{em} = 100^\circ\text{C}$ température du PVC à l'entrée de la granulatrice,
- $\theta(t)$ variation de température du PVC autour de 100°C ,
- $R_{thv} = 0,3 \text{ }^\circ\text{C/W}$ résistance thermique de l'échange PVC - vis,
- $R_{thc} = 0,2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ résistance thermique de l'échange PVC - cylindre,
- $C_{th} = 750 \text{ J/}^\circ\text{C}$ capacité thermique du PVC.

La température de la vis T_v est maintenue constante par un système de refroidissement à circulation d'huile. On la supposera homogène sur toute la vis.

La température du cylindre T_c est maintenue constante par un système de refroidissement à air pulsé dans les rainures. On la supposera homogène sur tout le cylindre.

L'énergie calorifique E_c , absorbée par un kilogramme de PVC, sera ramenée par simplification à un échelon de puissance constant, noté P_c , d'une durée correspondante au temps de passage de la matière dans la granulatrice noté t_p .

- $E_c = 45 \text{ kJ/kg}$
- $t_p = 90 \text{ s}$

Question 8 : calculer la valeur de l'échelon de puissance calorifique P_c fournie à un kilogramme de PVC.

Question 9 : à partir du modèle de comportement proposé à L'ANNEXE A-5, Calculer les éléments du schéma équivalent ANNEXE A-6 (en utilisant le théorème de Thévenin).

Question 10 : donner l'expression de l'équation différentielle en $\theta(t)$.

Question 11 : résoudre cette équation et l'exprimer sous forme numérique.

Question 12 : en déduire la valeur de l'élévation de température, ainsi que la température du PVC à la sortie de la filière.

Etude B Commande vectorielle de la machine asynchrone

La gélifieuse (double-vis ZSK 133) (ANNEXE B-0) réalise le cisaillement du PVC solide, la gélification et l'homogénéisation de la matière. Pour chaque produit est définie une formule qui comprend les additifs à incorporer, la température de travail et la vitesse de la vis.

La commande du moteur asynchrone (710 kW) est donc asservie en vitesse. Le débit matière fixe le couple : au démarrage, à vitesse nulle, un surcouple transitoire limité à 200% assure le décollement et permet l'entraînement de la double-vis. La vitesse est immédiatement réglée à sa valeur de consigne et l'opérateur par une action sur le moteur de gavage de la gélifieuse assure la montée au débit maximum de la machine. La limitation est fixée par le couple de cisaillement des vis (23200mN pour une ZSK 133).

La conduite de la machine nécessite donc un contrôle indépendant de la vitesse et du couple et ceci à très basse vitesse, voir à l'arrêt. Seule la commande vectorielle permet cette maîtrise et l'étude propose de mettre en évidence, en régime permanent, le découplage des grandeurs mécaniques et le mode de conduite par le courant statorique.

Hypothèses :

- La machine a un comportement linéaire (le matériau ferromagnétique est non saturé et de perméabilité constante),
- Les pertes fers sont négligées,
- Les harmoniques d'espace sont négligés,
- La machine est bipolaire,
- Le rotor est en court-circuit,
- Le rotor est lisse, l'entrefer est constant,
- L'effet de peau est négligé.

B-1 Force magnétomotrice

B-1-1 Considérons un stator dans les encoches duquel on a placé un enroulement à répartition sinusoïdale, alimenté par un courant sinusoïdal.

$$i(t) = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Soit F , la valeur efficace de la force magnétomotrice $F(t)$ créée par cet enroulement.

Question 13 : Donner l'expression de F_M , force magnétomotrice créée au point M de l'entrefer, repéré par un angle θ , par rapport à l'axe de la phase (ANNEXE B-1) en fonction de F et de θ .

B-1-2 Dans ce stator, considérons maintenant trois enroulements identiques d'axe décalé de 120° . Ils sont alimentés par un système triphasé équilibré de courant :

$$i_1(t) = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) \quad i_2(t) = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad i_3(t) = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Question 14 : exprimer le système triphasé de Forces magnétomotrices créé au point M de l'entrefer.

Question 15 : en déduire l'expression de la Force magnétomotrice équivalente F_M créée au point M de l'entrefer en fonction de F et de t .

Question 16 : citer le théorème de Ferraris. Dans l'histoire de l'électrotechnique, quelle application a permis au signal sinusoïdal de s'imposer au courant continu.

B-2 mise en équations

La question B-1 a permis de ramener le système de champs triphasés à un champ unique tournant à la vitesse ω . Il est possible de faire un choix dans la représentation électrique du stator en le modélisant :

- ♦ par un seul enroulement tournant à la vitesse ω et parcouru par un courant constant.
- ♦ par un seul enroulement fixe traversé par un courant d'expression complexe $\underline{I}(j, \omega)$.

B-2-1 Modélisation du stator triphasé par un enroulement unique

Le choix du modèle pour le stator s'est porté sur un enroulement fixe traversé par un courant $\underline{I}(j, \omega)$, dans le plan complexe dont l'axe des réels est confondu avec l'axe de l'enroulement fixe.

Question 17 : donner l'expression du courant équivalent $\underline{I}(j\omega)$ en fonction de I , valeur efficace du courant d'alimentation dans une phase et de θ .

B-2-2 Le rotor, sous l'influence du champ statorique, est le siège de phénomènes qui conduisent à la création de son propre champ rotorique.

Question 18 : rappeler succinctement l'origine de la création du champ propre rotorique.

De même que le stator, on peut choisir de modéliser le rotor par un enroulement unique, tournant à la vitesse du rotor et parcouru par un courant $\underline{I}_r(j\omega_g)$, ω_g étant la pulsation des courants rotoriques. Ce choix conduit à la représentation de l'ANNEXE B-2, où l'enroulement statorique est fixe et l'enroulement rotorique est tournant et repéré par un angle α .

- ♦ R_r résistance de l'enroulement rotorique équivalent
- ♦ R_s résistance de l'enroulement statorique équivalent
- ♦ L_r inductance propre de l'enroulement rotorique équivalent
- ♦ L_s inductance propre de l'enroulement statorique équivalent
- ♦ Φ_r flux propre complexe rotorique
- ♦ Φ_s flux propre complexe statorique
- ♦ M coefficient d'inductance mutuelle rotor-stator
- ♦ \underline{I}_r Courant complexe rotorique
- ♦ \underline{I}_s courant complexe statorique
- ♦ V_s tension complexe statorique

- ω pulsation des courants statoriques
- ω_r pulsation des courants rotoriques
- N nombre de spires au stator. Dans un but de simplification, on considérera que le rotor est également constitué par un enroulement de N spires.
- g glissement $g = \frac{\omega_r}{\omega}$
- σ coefficient de dispersion $\sigma = (1 - \frac{M^2}{L_r \cdot L_s})$

B-2-3 Mutuelle Stator-rotor.

B-2-3-1 Couplage parfait.

L'angle α est nul, les deux bobines stator et rotor sont fixes, comportent le même nombre de spires N et sont traversées par le même flux.

Question 19 : exprimer

- $\underline{\Phi}_s$ en fonction de $\underline{I}_s, \underline{I}_r, L_s$ et M
- $\underline{\Phi}_r$ en fonction de $\underline{I}_s, \underline{I}_r, L_r$ et M
- \underline{V}_s en fonction de \underline{I}_s, R_s et $\underline{\Phi}_s$
- \underline{V}_r en fonction de \underline{I}_r, R_r et $\underline{\Phi}_r$

B-2-3-2 Couplage partiel.

L'angle α est quelconque, (rappel : Le champ est à répartition sinusoïdale).

Question 20 : en notant M_0 la valeur de M quand α est nul, exprimer le coefficient d'inductance mutuelle rotor-stator M en fonction de α .

B-3 Modèle électrique

Une transformation mathématique permet de simplifier l'étude de la machine asynchrone en choisissant le même repère pour les enroulements statorique et rotorique, ce qui a pour effet de rendre le coefficient d'inductance mutuelle constant.

Cette transformation conduit à un schéma aux inductances couplées ANNEXE B-3 où tous les paramètres (R_r, R_s, L_s, L_r, M) sont constants.

Question 21 : à partir du modèle aux inductances couplées proposé ANNEXE B-3, exprimer le système d'équations électriques de la machine asynchrone :

- au stator en fonction de $\underline{V}_s, \underline{I}_s, R_s, L_s$ et M
- Au rotor en fonction de $\underline{I}_r, \frac{R_r}{g}, L_r$ et M

Question 22 : montrer que le modèle précédent peut s'exprimer sous la forme d'un modèle aux sources liées ANNEXE B-4 et exprimer les différents paramètres :

$$\underline{I}'_r = f(\underline{I}'_s, L_r, M)$$

$$N_s = f(L_s, \sigma)$$

$$V_s'' = f(\underline{V}'_r, M, L_r)$$

Question 23 : le modèle précédent est enfin ramené au stator, ANNEXE B-5, de manière à ce que toutes les grandeurs électriques soient à la même pulsation.

Exprimer les différents paramètres de ce dernier modèle.

$$L_m = f(L_s, \sigma)$$

$$R' = f(R_r, g, \sigma)$$

B-4 pilotage de la machine

B.4.1 Machine à courant continu

Question 24 : rappeler, pour une machine à courant continu, les relations (C_e , Φ_r , I) et (E , n , Φ_r)

Avec

- ♦ C_e couple électromagnétique (mN)
- ♦ Φ_r flux inducteur (Wb)
- ♦ I courant traversant l'induit (A)
- ♦ E force électromotrice (V)
- ♦ n vitesse de rotation (tr/s)

Question 25 : expliquer le découplage et le mode de contrôle des grandeurs mécaniques couple-vitesse dans une machine à courant continu et son intérêt.

B.4.2 Machine asynchrone

Question 26 : à partir d'un bilan de puissance au rotor, du modèle défini ANNEXE B-5 et des résultats de la question 23 :

- ♦ montrer que le couple électromagnétique de la machine asynchrone est de la forme $C_e = k \cdot \phi_r \cdot I_q$
- ♦ montrer que $\phi_r = M \cdot I_d$

Question 27 : expliquer succinctement comment est réalisé, dans une machine asynchrone associée à une commande vectorielle, le découplage des grandeurs mécaniques

Etude C Asservissement de température de la gélifieuse

La gélifieuse (double-vis ZSK) réalise le cisaillement du PVC solide, la gélification et l'homogénéisation de la matière. Pour chaque produit est définie une formule qui comprend les additifs à incorporer, la température de travail et la vitesse de la vis.

La qualité du semi-produit fini est étroitement liée à la précision obtenue par le contrôle de la température de gélification et la tolérance est de $\pm 0,5^\circ\text{c}$.

Le fourreau est constitué de trois éléments modulaires en acier nitruré. Le conditionnement thermique s'effectue par des coquilles de chauffage électrique et par un système de canaux forés pour le refroidissement à l'eau.

La température du PVC dans chaque élément est contrôlée par un régulateur industriel et maintenu à une consigne fixée par la formule.

Le débit de matière, réglé par gavage de la machine, agit comme une perturbation sur la température du PVC. En effet, les opérations de cisaillement et de gélification représente 80% de l'apport calorifique.

Cette partie propose l'étude de la précision en mode de poursuite et en mode de régulation avec une correction Proportionnelle puis Proportionnelle-Intégrale enfin un correcteur de tendance de la perturbation introduite par le réglage du débit matière.

L'étude est placée dans le cadre d'un asservissement continu et linéaire.

Le modèle de comportement de cet asservissement de température est proposé ANNEXE C-1.

s	opérateur de Laplace,
$\theta_c(s)$	variation de la consigne de température,
$\theta_m(s)$	variation de la température du PVC,
$d(s)$	variation en % (de 0 à 100) du débit matière,
$C(s)$	fonction de transfert du correcteur,
$A(s) = \frac{k_a}{(1 + \tau_a \cdot s)}$	fonction de transfert de la régulation chaud froid,
$H(s) = \frac{k_h}{(1 + \tau_h \cdot s)}$	fonction de transfert du comportement thermique de la matière,
$G(s) = \frac{k_d}{(1 + \tau_d \cdot s)}$	fonction de transfert vis à vis du réglage de débit matière.

Données numériques :	$k_a = 500$
	$\tau_a = 10s$
	$k_h = 0,025$
	$\tau_h = 100s$
	$k_d = 2500$
	$\tau_d = 50s$

C.1 Correction proportionnelle P

Pour cette étude, prendre $C(s) = k_c$, gain proportionnel constant.

C.1.1 Etude de la précision en mode de poursuite. $d(s) = 0$

Question 27 : exprimer $T_{Bo}(s) = \frac{\theta_m(s)}{\theta_c(s)}$ fonction de transfert Boucle Ouverte

Question 28 : exprimer $T_{BF}(s) = \frac{\theta_m(s)}{\theta_c(s)}$ fonction de transfert Boucle Fermée en fonction de $T_{Bo}(s)$ puis des paramètres du système

Question 29 : exprimer $T_{prec}(s) = \frac{\varepsilon(s)}{\theta_c(s)}$ fonction de transfert de précision en fonction de $T_{Bo}(s)$ puis des paramètres du système.

La précision souhaitée est de 0,5 degré sur un échelon de consigne θ_c de 40 degrés.

Question 30 : quelle valeur donner à k_c pour assurer cette précision ?

Question 31 : quelle est la valeur de la Bande Proportionnelle à afficher sur le régulateur ?

C.1.2 Etude de la précision en mode de régulation $\theta_c(s) = 0$

Question 32 : donner l'expression de $T_d(s) = \frac{\varepsilon(s)}{d(s)}$

Question 33 : avec le réglage de k_c obtenu à la question précédente, quelle est la précision sur la température du PVC lors d'un échelon de débit de 100% ?

C.1.3 Etude de la stabilité vis à vis de la consigne

Question 34 : citer des méthodes graphiques et algébriques d'étude de cette stabilité.

Question 35 : avec le réglage du correcteur proportionnel obtenu à la question 30, Les conditions de stabilité sont-elles satisfaisantes ? Le candidat pourra utiliser le document réponse DR-1. Quelle est la marge de phase obtenue ?

Question 36 : en prenant comme critère une marge de phase de 45 degrés, quelle valeur limite k_d faut-il donner à k_c ?

C.2 Correction proportionnelle et intégrale P.I.

$$C(s) = k_c \cdot \left(\frac{1 + \tau_i \cdot s}{s} \right)$$

C.2.1 réglage du correcteur P.I.

Pour assurer la précision de 0,5 degré, le correcteur est réglé en mode P.I. Le réglage est fait par compensation du pôle dominant et le gain $k_c=10$.

Question 37 : donner la valeur de τ_i choisie.

Question 38 : quels résultats peut-on attendre d'un correcteur PI ?

C.2.2 Précision en mode de régulation

Dans la conduite du processus, la consigne de température est constante et fixée par la formule du PVC. Le mode général de conduite est donc une régulation. Le débit matière, réglé par l'opérateur, agit directement sur la température de la matière. Les sollicitations sur cette entrée sont peu brutales et l'on considère que la montée au débit maximum (de 1 à 100) est linéaire et dure 4 minutes.

Question 39 : quelle est l'expression de $d(s)$?

Question 40 : calculer la nouvelle fonction de transfert $T_d(s) = \frac{\xi(s)}{d(s)}$

Question 41 : quelle est l'expression littérale puis la valeur de l'erreur de traînage introduite par cette entrée ? la précision est-elle assurée ?

C.3 Correcteur de tendance

La perturbation $d(s)$ est complètement connue, et il est possible d'agir en amont pour améliorer le comportement global de l'ensemble. La structure de cette correction est proposée ANNEXE C-2.

Question 42 : calculer la fonction de transfert $F(s)$ qui permet d'annuler les effets de cette perturbation sur la sortie $\theta_m(s)$.

---- **FIN de la PREMIERE PARTIE** -----

DEUXIEME PARTIE

ETUDE DE L'ALIMENTATION ELECTRIQUE DE LA GRANULATRICE.

Données relatives à l'alimentation électrique de la granulatrice.

L'annexe P2 propose un synoptique de l'installation et l'annexe D1 définit l'élément du réseau support des études D, E, F et G.

Soit un départ moteur 1250 A, du tableau général basse tension (TGBT) au tableau moteur, dont la liaison d'une longueur de 200 m est réalisée avec deux câbles aluminium de 500 mm² par phase.

Caractéristiques de la liaison TGBT / Tableau moteur

- ♦ Deux câbles aluminium par phase de 500 mm².
- ♦ Réactance du câble : 0,09 mΩ/m.
- ♦ Longueur maximum de la liaison : 200m.
- ♦ Courant nominal de la liaison : 1000 A.
- ♦ Tension nominale : 400 V.

Caractéristiques du disjoncteur (DJ2)

- ♦ Disjoncteur Merlin Gérin Masterpact (1250 A) M 12 - H1.
- ♦ Unité de contrôle Merlin Gérin STR 58U,
 - seuil instantané (Inst) réglé en usine : I,
 - seuil court retard (CR) réglable : I_m,
 - temporisation court retard réglable,
 - seuil long retard (LR) réglable : I_r,
 - temporisation long retard réglable.
- ♦ voir caractéristiques détaillées du disjoncteur M12 et de son unité de contrôle STR 58U en annexes D2 à D6.

Caractéristiques du disjoncteur (DJ3)

Le disjoncteur DJ3 (commande et protection du moteur) ne joue aucun rôle dans le contexte de cette étude.

Caractéristique des fusibles F3

- ♦ Fusible 500 aM, sa courbe de fusion est fournie sur le document réponse DR 2.

Réglages des seuils de déclenchement et des temporisations

- ♦ Courant nominal dans les câbles : $I_{nc} = 1000 \text{ A}$.
- ♦ Courant assigné du disjoncteur (DJ2) : $I_n = 1250 \text{ A}$.
- ♦ Réglages de l'unité de contrôle STR 58U.
 - Seuil de protection long retard : I_r ,
 - $I_r = 1,2 I_{nc}$,
 - temporisation réglée à :
 - 60 s pour $1,5.I_r$,
 - 3,75 s pour $6.I_r$,
 - 2,6 s pour $7,2.I_r$.
 - Seuil de protection court retard : I_m ,
 - seuil à définir afin d'assurer une bonne sélectivité,
 - temporisation à définir.
 - Seuil instantané (réglage en usine) : I ,
 - $I = 24.I_n$.

Caractéristiques du moteur asynchrone triphasé (plaque signalétique)

- ♦ Puissance nominale : 220 kW.
- ♦ Tension nominale : 400 V.
- ♦ Vitesse : 1490 tr/min.
- ♦ Rendement : 0,96.
- ♦ $\cos \varphi$: 0,88.
- ♦ $I_d/I_n = 6,2$.
- ♦ Temps de démarrage : 1,4 s.

Caractéristiques du transformateur triphasé (TR1)

- ♦ Tensions nominales : 6 kV/400 V.
- ♦ Tension de court-circuit : $U_{cc} = 6 \%$.
- ♦ Puissance nominale : 1600 kVA.
- ♦ Tension secondaire à vide : 415 V.

Caractéristiques du réseau 6 kV en amont du transformateur TR1

- ♦ Puissance de court-circuit maximale : 190 MVA.
- ♦ Puissance de court-circuit minimale : 82 MVA.

D . 1. Justification des choix technologiques.

Question 43 : *le choix d'un fusible du type aM est-il justifié?*

Argumenter la réponse, chiffrer les arguments (pointe d'intensité, durée de démarrage...).

Question 44 : *il est d'usage de classer les protections selon les terminologies suivantes :*

- protection thermique,
- protection magnétique instantanée,
- protection magnétique retardée.

Dans notre cas, associer à ces trois terminologies, les qualificatifs «LR, CR, Inst» utilisés dans la documentation sur l'unité de contrôle « RMS » (voir annexes D2 à D6).

Question 45 : *désigner les éléments protégés par le fusible aM, les protections LR, CR, et Inst et dites vis à vis de quels défauts agissent ces quatre protections.*

D . 2 . Proposition d'une solution.

Pour assurer la sélectivité entre le disjoncteur DJ2 et le fusible aM on adopte, pour un temps de 0,3 s, le réglage de I_m égale à 1,25 fois l'intensité de fusion du fusible.

A l'aide de la documentation (annexes D2 à D6) sur le disjoncteur et son unité de contrôle, et en optant pour l'option « I^2t » en position « OFF ».

Question 46 : *donner la valeur du coefficient multiplicateur de I_r (long retard) permettant d'effectuer le réglage de I_m (court retard).*

Question 47 : *sur le document réponse DR 2, compléter le tracé de la zone de fonctionnement du disjoncteur DJ2.*

Question 48 : *la sélectivité ainsi obtenue, entre les fusibles aM et le disjoncteur DJ2, est-elle suffisante? La mise en service de l'option « I^2t » (position ON) améliore-t-elle la sélectivité? Chiffrer et argumenter la réponse.*

Etude E Concept de sûreté de fonctionnement des protections.

E . 1 . Enoncé du «principe de réserve».

Le concept de sûreté retenu est nommé « principe de réserve », il impose qu'un défaut en tout point du réseau puisse être éliminé par deux disjoncteurs différents.

Une solution économique (sans redondance de matériels) consiste à ce que la défaillance d'un disjoncteur aval soit palliée par le disjoncteur situé juste en amont ; ce concept doit préserver une sélectivité minimale entre ces deux disjoncteurs.

Seul le fusible est considéré comme une protection infaillible.

E . 2 . Exemple d'application du principe sur un élément radial du réseau.

Annexe D1, le relais ampèremétrique RMST 7992 agissant sur le disjoncteur DJ1 possède deux seuils réglables.

- Un réglage haut du courant (noté $I_{>>}$) à déclenchement quasi instantané assure la protection principale du transformateur, (fonctionnement normal du disjoncteur) ; la caractéristique de réponse temps/courant est à temps indépendant.

- Un réglage bas du courant (noté $I_{>}$) et à déclenchement temporisé assure la protection « dite de réserve » ; la caractéristique de réponse temps/courant est au choix à temps indépendant ou à temps dépendant.

En fonctionnement normal, le disjoncteur DJ2 doit être capable de couper le courant de court-circuit maximum provoqué par un défaut en A. Il doit aussi déclencher lorsque le courant de court-circuit, provoqué par un défaut en B, est minimum ; le point B appartient au départ moteur le plus éloigné du tableau général basse tension (TGBT). A cause de la sélectivité le défaut en A ne provoque pas le déclenchement de DJ1.

En fonctionnement de « réserve », c'est à dire dans le cas où le disjoncteur DJ2 est défaillant, le disjoncteur DJ1 doit être capable de couper lorsqu'un défaut en B engendre un courant minimum de court-circuit.

Remarque : dans notre application un relais ITG ajoute une zone de fonctionnement de type thermique à temps dépendant inverse.

E . 3 . Etude théorique préliminaire.

Sur une installation triphasée, la mise simultanée des trois phases en court-circuit provoque le courant de court-circuit **maximum**.

Le courant de défaut **minimum**, pris en compte pour une telle étude, correspond au court-circuit biphasé **avec arc électrique**. Le courant de court-circuit biphasé avec arc (I_{cc2a}) s'exprime en fonction du courant de court-circuit biphasé franc (sans arc électrique) noté I_{cc2} .

La relation entre ces deux courants s'écrit :

$$I_{cc2a} = k \cdot I_{cc2}$$

avec $k = 1$ pour la haute tension
et $k = \frac{1}{\sqrt{3}}$ pour la basse tension.

La puissance de court-circuit au point A sera notée S_{cc} , la tension entre phase sera notée U_n , l'impédance totale d'une phase du réseau ramenée sous la tension U_n (coté B.T.) notée Z_{cc} et la résistance de l'arc notée R_a .

Question 49 : donner l'expression littérale du courant de court-circuit triphasé I_{cc3} .

Question 50 : donner l'expression littérale du courant de court-circuit biphasé franc I_{cc2} et montrer que I_{cc2a} est égale à la moitié de I_{cc3} .

E . 4 . Calculs préliminaires.

La garantie d'une sélectivité minimale et les réglages pour la mise en œuvre du concept de sûreté nécessitent les calculs qui suivent.

Question 51 : calculer la valeur minimale de l'impédance (Z_{12}) de la ligne en amont du transformateur TR1, ramenée au secondaire (sous 400 V) ; la résistance de la ligne est négligeable.

Question 52 : calculer la valeur de l'impédance (Z_{TR1}) du transformateur vu du secondaire (la résistance est négligée).

Question 53 : calculer au point A l'intensité du court-circuit triphasé franc le plus violent ; calculer la puissance de court-circuit maximale au point A. L'impédance du disjoncteur est négligée, la réactance de la liaison entre le transformateur TR1 et le disjoncteur DJ2 vaut $0,9 \text{ m}\Omega$ (la résistance est négligée).

Question 54 : le pouvoir de coupure du disjoncteur DJ2 choisi est-il compatible avec les calculs précédents? Faut-il envisager une modification du réglage d'usine du seuil de déclenchement instantané? Si oui, argumenter et proposer une solution.

Question 55 : calculer l'impédance de la liaison en câble aluminium reliant les points A et B. La section importante du câble autorise à négliger sa résistance.

Question 56 : calculer l'intensité minimale du court-circuit triphasé au point B ; calculer l'intensité minimale du court-circuit **biphasé avec arc** au point B.

E . 5 . Mise en œuvre de la protection dite de réserve.

Question 57 : à partir des caractéristiques du disjoncteur DJ2 (voir annexes) tracer, sur le document réponse DR 2, la portion de la courbe donnant la limite de la tenue thermique de ce disjoncteur.

Question 58 : les relais ampèremétriques RMST 7992 et ITG 7366 donnent, tous les deux, des ordres de déclenchement au disjoncteur DJ1, ils offrent la possibilité de combiner trois courbes complémentaires de déclenchement.

- Une courbe à temps indépendant quasi instantané (retard de 0,1 s) réglé à un seuil haut noté $I_{>>}$.
- Une courbe à temps indépendant (temporisé court retard) réglé à 0,5 s.
- Une courbe à temps inverse (type thermique) pour éliminer les défauts les plus éloignés.

Dans la suite du sujet, on adopte les valeurs suivantes : courant de maximum de court-circuit triphasé à la sortie du transformateur 36 kA, courant maximum de court-circuit triphasé en A de 32 kA et un courant minimum biphasé avec arc en B de 4 kA.

Sur le document réponse DR 2, tracer (sans faire de calculs particuliers) les trois parties de la courbe de déclenchement assurant la sélectivité entre DJ1 et DJ2, le principe de réserve entre DJ1 et DJ2 et la tenue thermique du disjoncteur DJ2. Un tracé d'un simple trait donnant la valeur médiane de la zone de fonctionnement est suffisant.

Etude F

Maîtrise des chutes de tension.

F . 1 . Expression de la chute de tension.

L'expression usuelle de la chute de tension s'écrit : $\Delta U/U = S_n/S_{cc}$, avec S_n la puissance apparente récepteur créant la perturbation, S_{cc} la puissance de court-circuit du réseau au point de connexion de la charge et $\Delta U/U$ la chute de tension relative à ce point de connexion.

Question 59 : démontrer cette formule sans omettre de fournir le schéma utilisé et de justifier les hypothèses effectuées. Prendre si nécessaire Z_a l'impédance totale d'une phase en amont du point de connexion et Z_c l'impédance de la charge pour une phase.

F . 2 . Calculs des chutes de tension.

Retenir les puissances de court-circuit suivantes.

- ♦ S_{cc} en amont du transformateur : 190 MVA.
- ♦ S_{cc} au point A : 25 MVA.
- ♦ S_{cc} au point B : 7 MVA.

Au démarrage la puissance apparente du moteur est proportionnelle au courant de démarrage.

Question 60 : calculer la chute de tension au point A (annexe D1) et au point B au moment du démarrage du moteur de puissance utile 220 kW.

Question 61 : calculer ces deux chutes de tension créées par le fonctionnement nominal du moteur.

Question 62 : calculer, au début du démarrage, la chute de tension sur le réseau de distribution en amont du transformateur TR1.

Question 63 : commenter les résultats de ces calculs, proposer une solution si un élément sensible aux chutes de tension est connecté en B.

F . 3 . Etude de la solution avec transformateur-bloc.

Pour limiter les effets du démarrage direct des moteurs asynchrones, il est possible d'utiliser un transformateur spécifique appelé communément «transformateur-bloc». Ce transformateur est caractérisé par une tension de court-circuit élevée tout en conservant les mêmes caractéristiques qu'un transformateur standard de puissance identique, notamment les mêmes pertes cuivre.

L'association d'un moteur à son propre transformateur-bloc dimensionné en fonction des caractéristiques de démarrage et de fonctionnement assure une bonne performance.

Question 64 : *expliquer le principe de fonctionnement de ce procédé de démarrage, définir clairement le rôle du (ou des) élément(s) du schéma équivalent du transformateur-bloc qui influe(nt) sur le démarrage.*

Question 65 : le transformateur-bloc de puissance 315 kVA, de tension nominale 400V et de tension de court-circuit 8 % remplace le transformateur standard TR1 de l'annexe D1.

Le courant de démarrage est alors réduit de 35 % par rapport au démarrage direct étudié précédemment.

Calculer la chute de tension au point A au moment du démarrage.

Question 66 : *donner les avantages et les inconvénients d'un tel procédé de démarrage. Comparer cette solution non retenue à celle retenue et décrite en annexe D1.*

Etude G

Vérification de la tenue thermique du câble.

Le concept de sûreté utilisé augmente la contrainte sur le matériel, la tenue thermique des câbles doit être vérifiée.

La durée relativement faible des courts-circuits autorise l'assimilation de l'échauffement des câbles à un régime adiabatique, la quantité d'énergie (dW) dégradée en chaleur n'est pas transmise vers l'extérieur.

G . 1 Expression de l'échauffement.

Question 67 : donner l'expression de l'échauffement ($d\theta$) en fonction de la quantité d'énergie (dW). Préciser l'unité et la grandeur de chaque terme de l'expression.

Question 68 : donner l'expression de la quantité d'énergie dégradée en chaleur, par un conducteur de résistance R parcouru par un courant de valeur I_{eff} . Préciser les unités.

Question 69 : la formule pratique, $\Delta\theta = (I_{eff}/S)^2 \cdot t / k^2$, est utilisée pour calculer la contrainte thermique dans un câble, avec I_{eff} en ampère, t en seconde, S la section en mm^2 , $\Delta\theta$ l'échauffement en $^{\circ}C$ et $k = 8,5$ pour l'aluminium et 13 pour le cuivre.

Formuler les hypothèses qui conduisent à cette formule pratique à partir des expressions précédentes de dW et de $d\theta$.

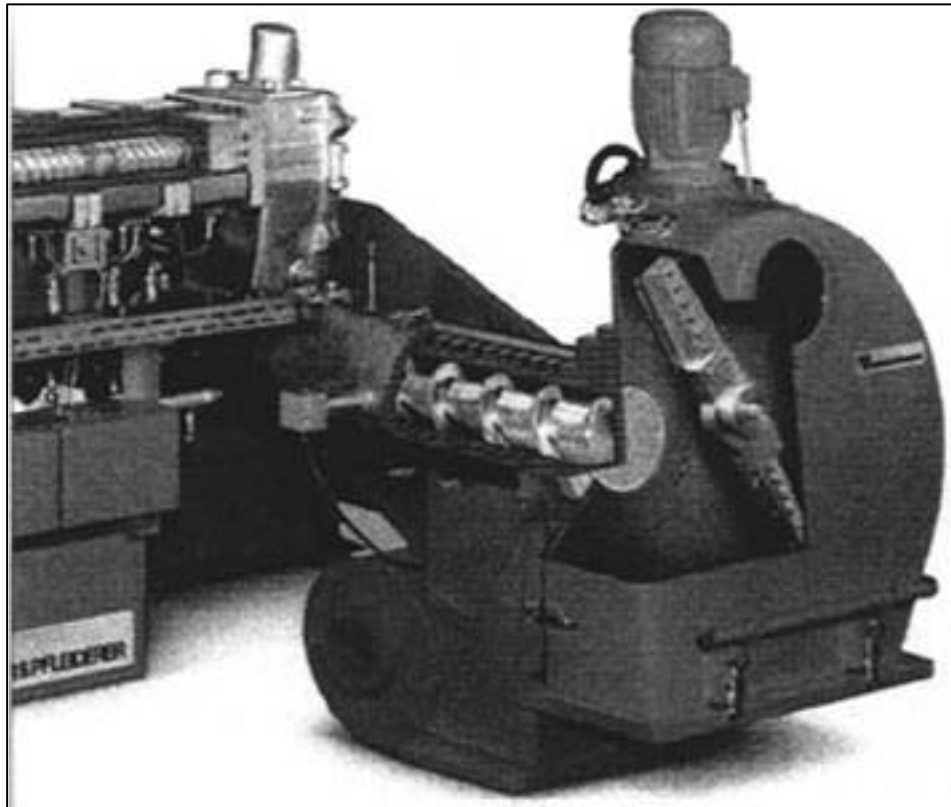
G . 2 . Tracé de la courbe limite de tenue thermique du câble.

Question 70 : à l'aide de la formule pratique (question précédente) et pour un échauffement limité à $130^{\circ}C$, tracer (sur le document réponse n° DR 2) la courbe de tenue thermique du câble aluminium reliant les points A et B. La tenue du câble est-elle correcte? Conclure.

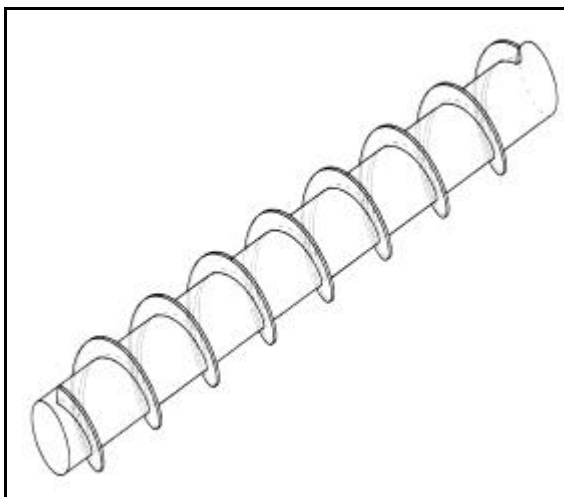
----- **FIN de la DEUXIEME PARTIE** -----

ANNEXES

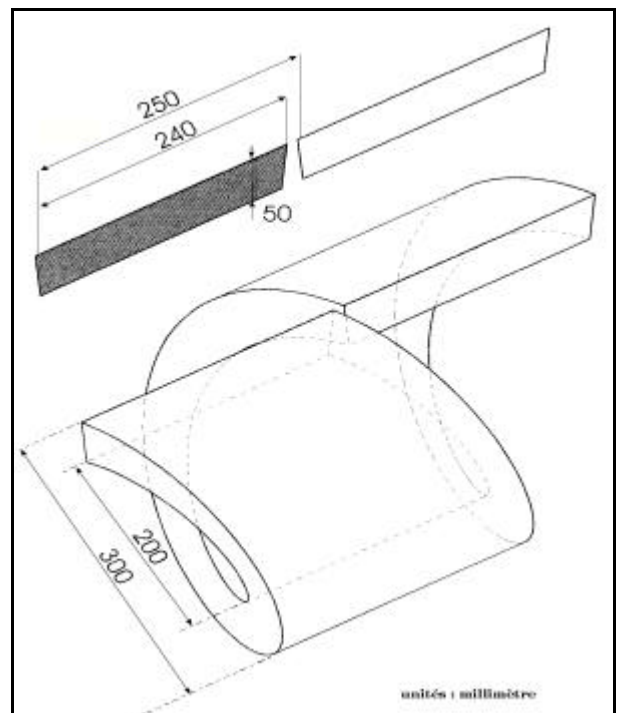
- A1 Granulatrice
- A2 Vis ES - A de la granulatrice
- A3 Géométrie de l'hélice de matière
- A4 Eléments de mécanique des fluides
- A5 Modèle du comportement thermique de la granulatrice
- A6 Modèle équivalent
- B1 Repérage de l'angle θ
- B2 Modélisation du rotor
- B3 Modèle aux inductances couplées
- B4 Modèle aux sources liées
- B5 Modèle ramené au stator
- C1 Asservissement de température
- C2 Correcteur de tendance
- D1 Schéma de l'alimentation de la granulatrice
- D2 Caractéristiques du disjoncteur Masterpact (DJ2)
- D3 Présentation de l'unité de contrôle STR58 U
- D4 Description de l'unité de contrôle STR 58 U
- D5 Caractéristiques de l'unité de contrôle STR 58 U
- D6 Courbes de déclenchement de l'unité de contrôle STR 58 U
- P1 Vue générale de la granulatrice.



Annexe A-1
Granulatrice



Annexe A-2
Vis ES-A (granulatrice)



Annexe A-3
géométrie de l'hélice de matière

Equation de Bernouilli :

$$\frac{1}{2}.m.(v_2^2 - v_1^2) + \frac{1}{\rho}.m.(p_2 - p_1) + m.g.(z_2 - z_1) = E_f - J_s - J_r$$

Cette équation est le bilan énergétique pour un fluide en mouvement dans une conduite entre deux points 1 et 2.

♦ $\frac{1}{2}.m.(v_2^2 - v_1^2)$ **variation d'énergie cinétique**

v_i (m/s) vitesse d'écoulement au point i considéré
 m (kg) masse du fluide

♦ $\frac{1}{\rho}.m.(p_2 - p_1)$ **variation d'énergie de pression**

p_i (Pa) pression au point i considéré
 ρ (kg/m³) masse volumique du fluide
 m (kg) masse du fluide

♦ $m.g.(z_2 - z_1)$ **variation d'énergie de pesanteur**

g (m/s²) accélération due à la pesanteur
 z_i (m) altitude du centre de masse au point i considéré
 m (kg) masse du fluide

♦ J_s **pertes de charges singulières (Joules)**

Quand la conduite subit de brusques variations de section ou de direction, il se produit des pertes de charges dites singulières. Elle s'expriment par la relation :

$$J_s = \zeta \cdot \frac{1}{2}.m.v^2$$

v (m/s) vitesse la plus grande dans l'accident de forme
 ζ s.i. coefficient de perte de charge singulière
 m (kg) masse du fluide

♦ J_r **pertes de charges systématiques (Joules)**

C'est la perte d'énergie d'un fluide qui se déplace dans une conduite cylindrique rectiligne de section constante.

$$J_r = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{1}{2}.m.v^2 \quad (\text{formule de Weisbach})$$

v (m/s) vitesse moyenne d'écoulement
 d (m) diamètre de la veine
 L (m) longueur de la conduite
 λ s.i. coefficient de perte de charge linéaire
 m (kg) masse du fluide

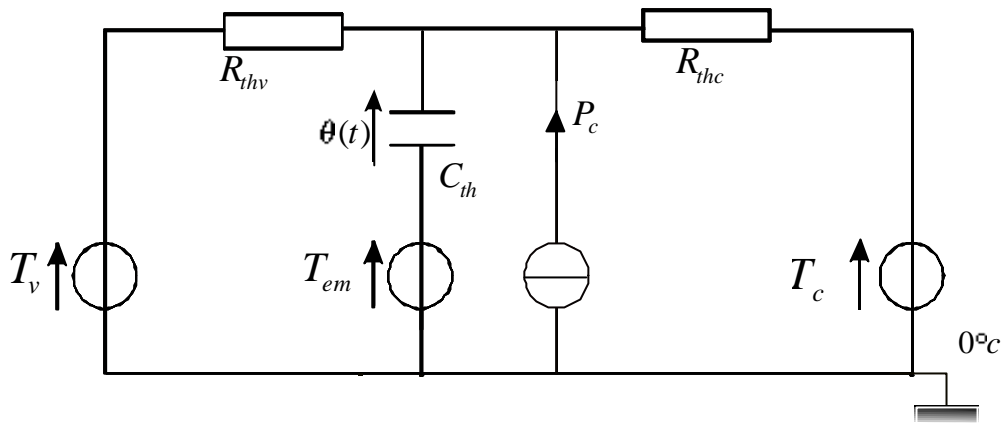
λ est donné par la formule de Poiseuille (pour un écoulement laminaire) $\lambda = \frac{64}{\Re}$

où \Re représente le nombre de Reynolds $\Re = \frac{v.d}{\nu}$

d (m) diamètre de la veine
 v (m/s) vitesse moyenne d'écoulement
 ν (m²/s) viscosité cinématique du fluide

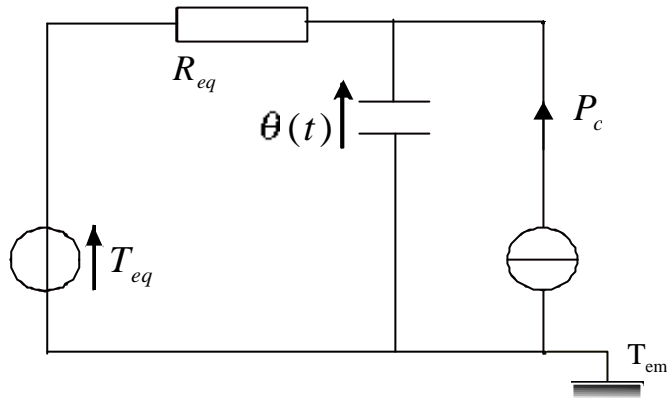
♦ E_f **énergie fournie par la vis (Joules)**

ANNEXE A-4- éléments de mécanique des fluides

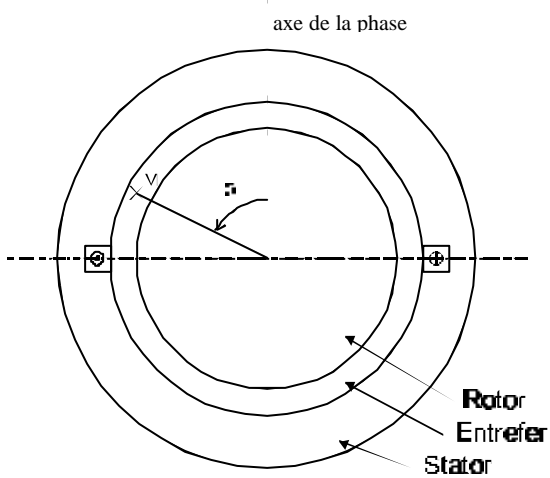


Modèle du comportement thermique de la granulatrice

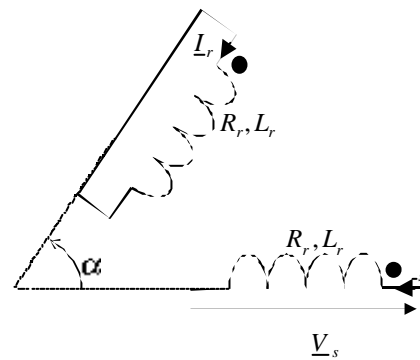
ANNEXE A-5



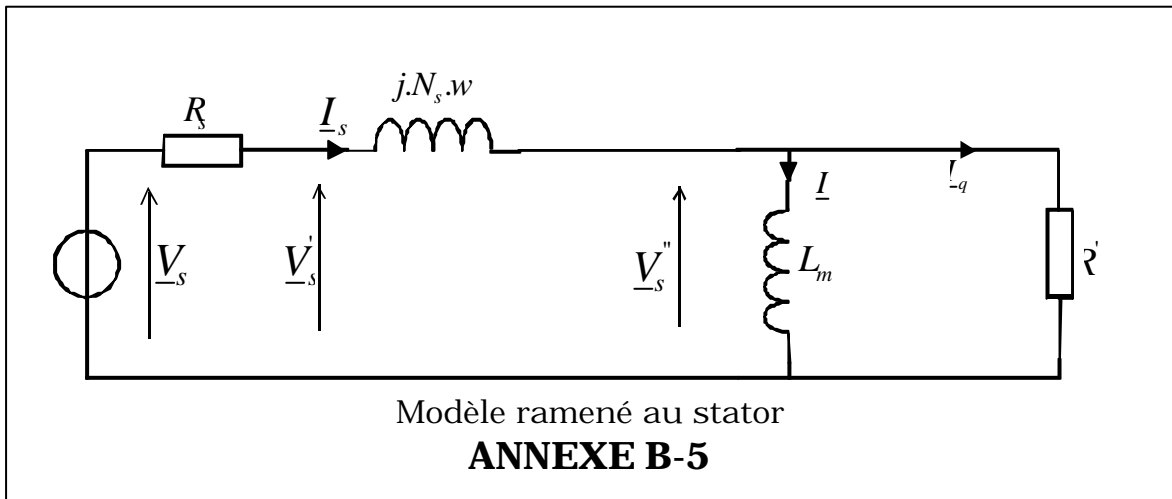
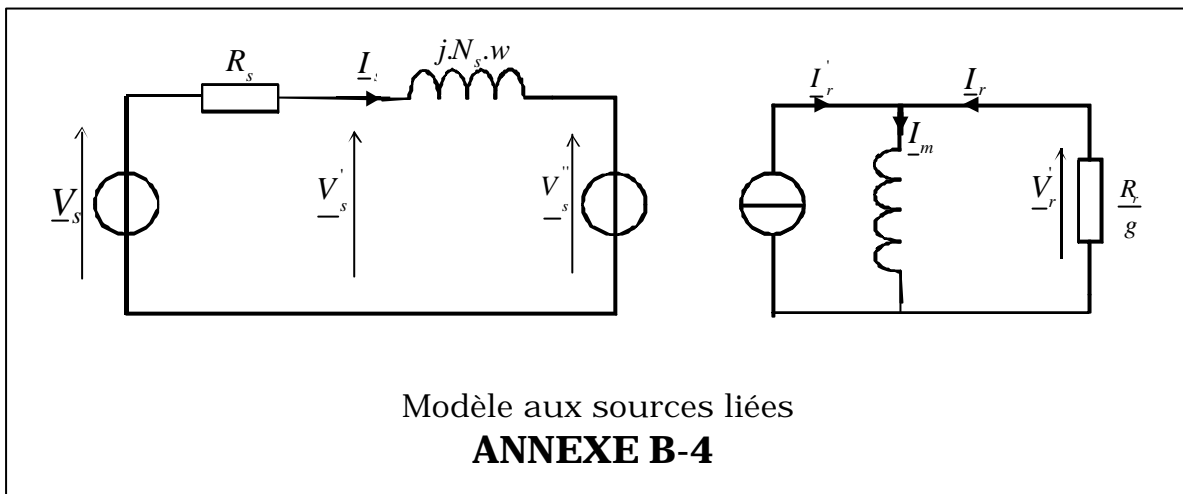
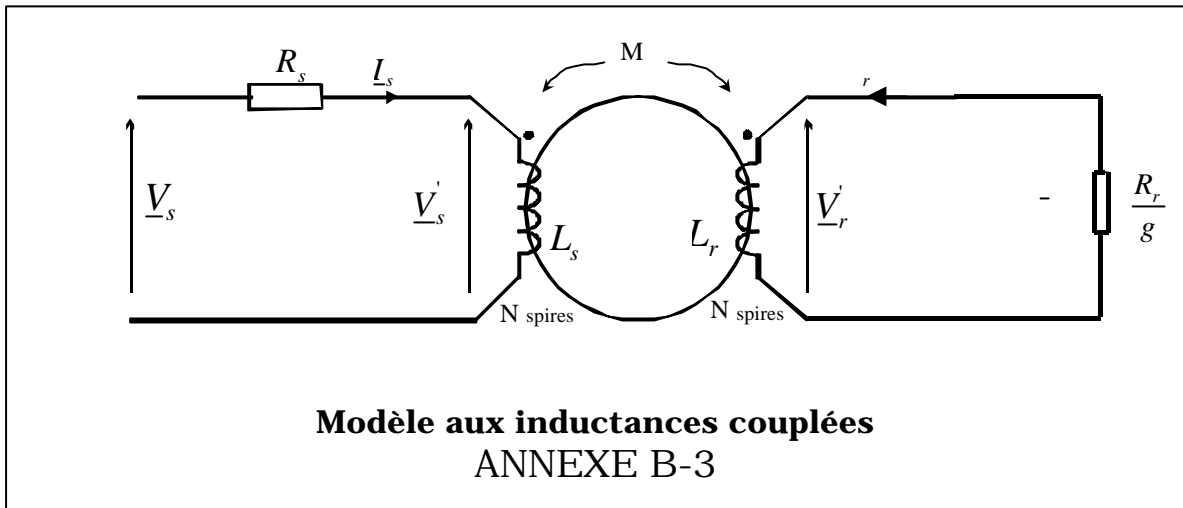
modèle équivalent - ANNEXE A-6

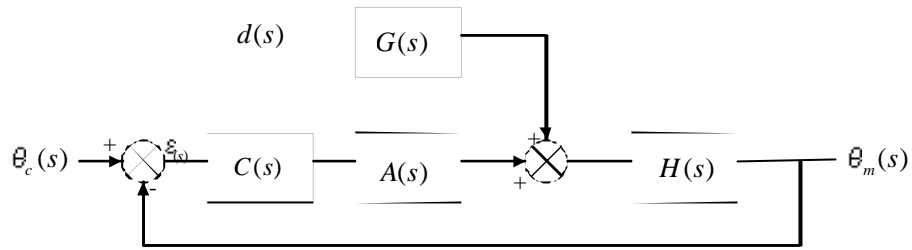


ANNEXE B-1



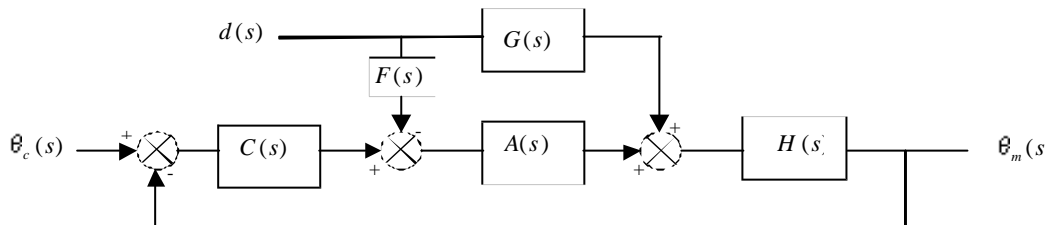
ANNEXE B-2





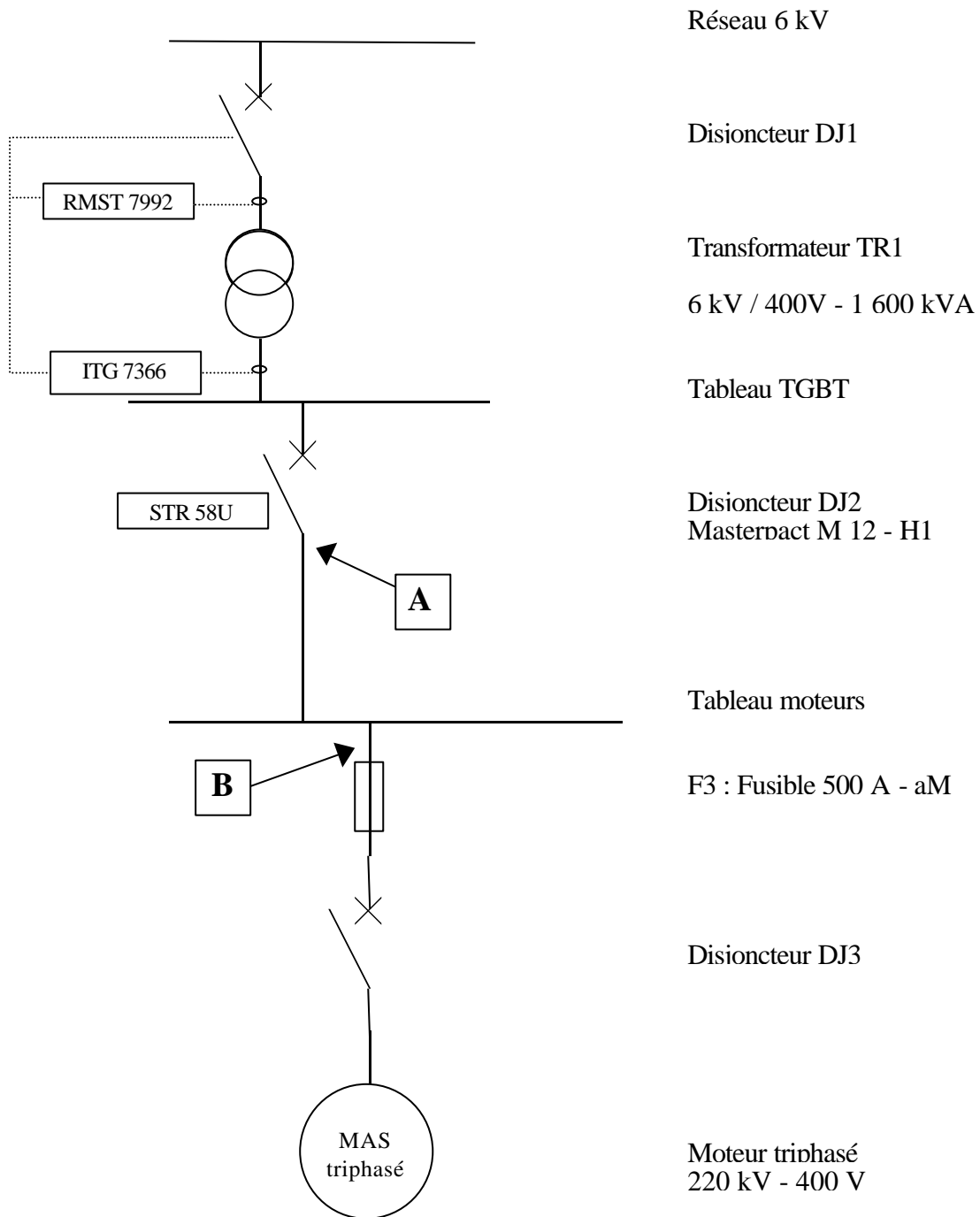
Asservissement de température

ANNEXE C-1



Correcteur de tendance

ANNEXE C-2



ANNEXE D-1 Schéma de l'alimentation de la granulatrice

caractéristiques électriques ⁽¹⁾				M08				M10				M12				
courant assigné (A) ⁽²⁾	In	à 40° C		800				1 000				1 250				
tension assignée d'emploi (V)	Ue	50/60 Hz		690				690				690				
tension assignée d'isolement (V)	Ui			1 000				1 000				1 000				
nombre de pôles				3,4				3,4				3,4				
calibre du 4 ^e pôle (A)				800				1 000				1 250				
type de disjoncteur																
pouvoir de coupure	pouvoir de coupure ultime CA 50/60 Hz (kA eff.) ⁽³⁾	Icu CEI 947-2 cycle O-FO	220/415 V	40	65	100	130	40	65	100	130	40	65	100	130	
			440 V	40	65	100	110	40	65	100	110	40	65	100	110	
	pouvoir assigné de coupure de service CA 50/60 Hz (kA eff.) ⁽³⁾	Ics CEI 947-2 cycle O-FO-FO	220/415 V	40	65	100	130	40	65	100	30	40	65	100	130	
			440 V	40	65	100	110	40	65	100	110	40	65	100	110	
	courant assigné de courte durée admissible CA 50/60 Hz (kA eff.)	Icw CEI 947-2	0,5 s	40	65	65	12	40	65	65	12	40	65	65	12	
			1 s	30	50	50	12	30	50	50	12	30	50	50	12	
	pouvoir assigné de fermeture CA 50/60 Hz (kA crête)	Icm CEI 947-2	220/415 V	84	143	220	286	84	143	220	286	84	143	220	286	
			440 V	84	143	220	242	84	143	220	242	84	143	220	242	
	pouvoir de coupure (kA)	Nema cycle O-FO	480 V	84	143	187	143	84	143	187	143	84	143	187	143	
			600 V	40	65	100	100	40	65	100	100	40	65	100	100	
tension de tenue aux chocs (V)	Uimp			8000				8000				8000				
tenue électrodynamique		(kA crête)		84	143	143	24	84	143	143	24	84	143	143	24	
aptitude au sectionnement		CEI 947-2		■				■				■				
temps de coupure				total maxi. 25 à 30 ms sans retard intentionnel - 9 ms pour type L1												
temps de fermeture				70 ms												
calibre In des capteurs (A) (voir en bas de page)				200 à 800				200 à 1 000				200 à 1 250				
unités de contrôle pour protection	instantanée	STR 18 M		■	■	■		■	■	■		■	■	■		
	distribution	STR 28 D		■	■	■		■	■	■		■	■	■		
	sélective	STR 38 S		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	universelle	STR 58 U		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
		STR 68 U ⁽⁴⁾		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
interrupteur (disjoncteur sans protection)	type		NI	HI	HF		NI	HI	HF		NI	HI	HF			
	boîtier cache	STR 08		■	■		■	■			■	■				
	déclencheur	STR 18 I		■				■				■				
pouvoir assigné de fermeture CA 50/60 Hz (kA crête)	440 V		84	105	143		84	105	143		84	105	143			
	500/690 V		84	105	143		84	105	143		84	105	143			
courant assigné de courte durée admissible				type NI : identique au disjoncteur de type N1												
endurance mécanique avec entretien (cycle FO) × 1 000 sans entretien				20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	15	
	endurance électrique appareil sans entretien	440 V		10	10	10	3	10	10	10	2,7	10	10	10	2,5	
		690 V		10	10	10	3	10	10	10	2,7	10	10	10	2,5	
	commande moteurs (AC3-937-4) ⁽⁵⁾	690 V		10	10	10		10	10	10		10	10	10		
installation	raccordement			PAV PAR				PAV PAR				PAV PAR				
		version	débrochable	■	■			■	■			■	■			
		fixe	■	■			■	■			■	■				
	dimensions (mm)	H × L × P	débro.	3P	439	435	367		439	435	367		439	435	367	
				4P	439	550	367		439	550	367		439	550	367	
		fixe	3P	356	422	290		356	422	290		356	422	290		
			4P	356	537	290		356	537	290		356	537	290		
		masse maximale (kg)	débro.	3P	65	65	65	69	65	65	65	69	65	65	65	69
				4P	80	80	80	85	80	80	80	85	80	80	80	85
		fixe	3P	43	43	43	46	43	43	43	46	43	43	43	46	
4P	54		54	54	58	54	54	54	58	54	54	54	58			

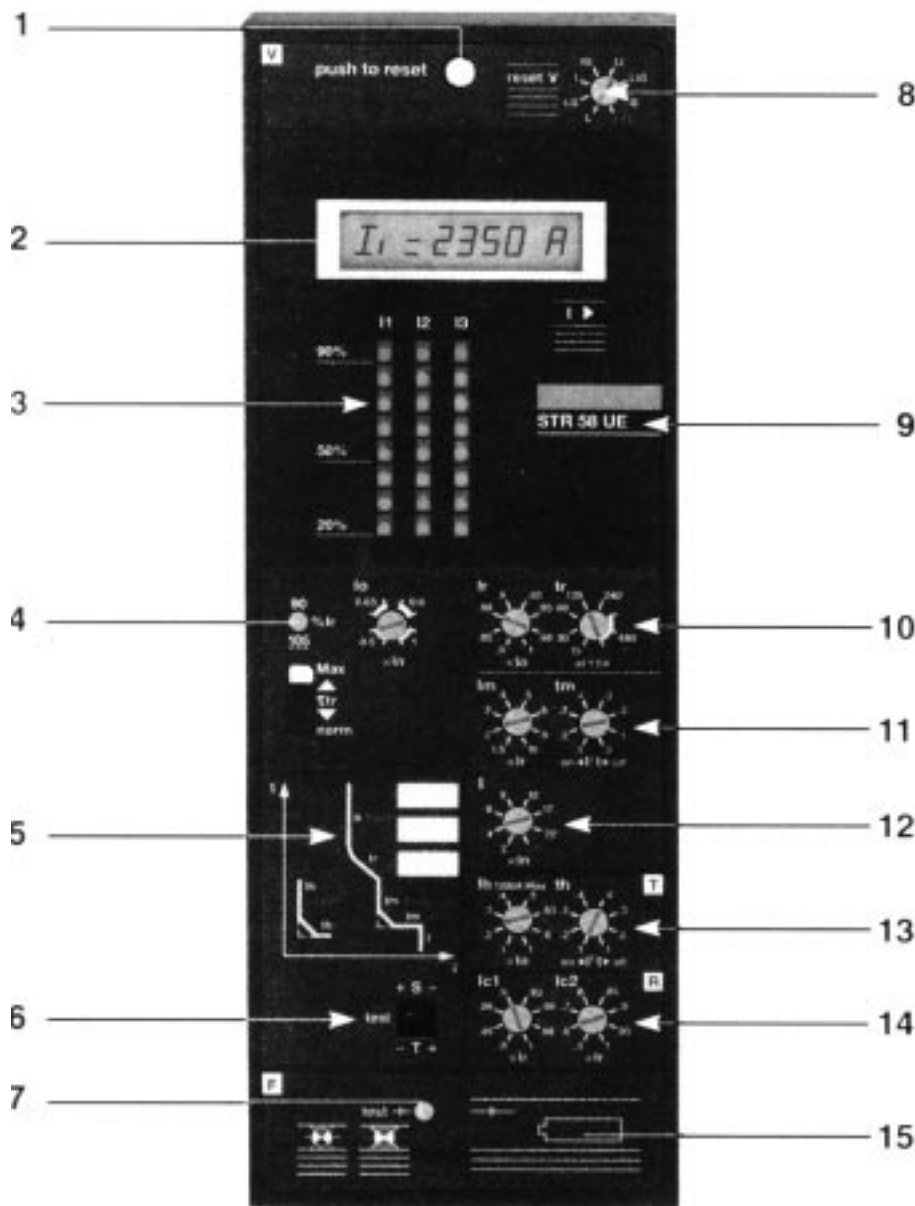
choix des capteurs

Le tableau ci-dessous indique :

- la totalité des calibres In des capteurs disponibles.
- les limites du réglage du seuil long retard lr.

In (A)	200	250	320	400	500	600	630	800	1 000	1 200	1 250	1 600	2 000	2 500	3 000	3 200	4 000	5 000	6 000	6 300
rég. du seuil lr (A)	80	100	125	160	200	240	250	320	400	480	500	640	800	1 000	1 200	1 280	1 600	2 000	2 400	2 500
	à 200, à 250	à 320	à 400	à 500	à 600	à 630	à 800	à 1 000	à 1 200	à 1 250	à 1 600	à 2 000	à 2 500	à 3 000	à 3 200	à 4 000	à 5 000	à 6 000	à 6 300	

ANNEXE D-2 Caractéristiques du disjoncteur Masterpact (DJ2)



1. Voyant-poussoir : signalisation de déclenchement sur défaut, n'autorise la fermeture du disjoncteur qu'après réarmement
2. Ampèremètre à affichage numérique
3. Indicateurs de niveau de courant
4. Témoin lumineux de surcharge
5. Témoin lumineux de déclenchement sur défaut long-retard, court-retard, terre
6. Bornes de test
7. Test de bon fonctionnement de la pile
8. Choix du type de défaut pour alarme différenciée : Ir et/ou Im et/ou Ih
L : défaut long-retard (Ir)
I : défaut sur court-circuit (Im/I)
T : défaut terre (Ih)
9. Référence de l'unité de contrôle
M : protection instantanée
D : distribution
S : protection sélective
U : universelle
10. Réglages long-retard
11. Réglages court-retard
12. Réglage de l'instantané à haut seuil
13. Réglages protection terre
14. Réglages contrôle de charge
15. Pile pour témoin de défaut

Nota : En version interrupteur (disjoncteur sans protection), l'unité de contrôle est remplacée :
 ■ pour les types NI et HI, par le boîtier cache STR08;
 ■ pour le type HF par le déclencheur instantané à la fermeture STR18I.

Face avant : STR 58 UE

annexe technique

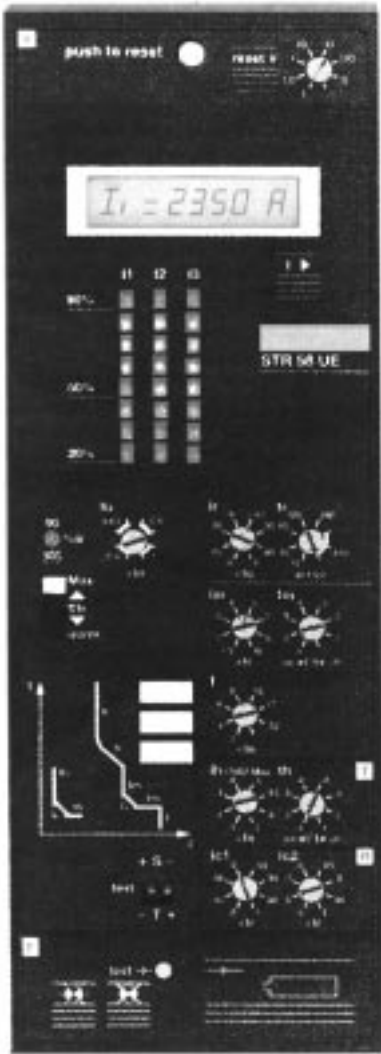
Mesure "RMS"
 RMS (root mean square) signifie valeur efficace vraie : l'unité de contrôle mesure la valeur efficace réelle du courant, quelle que soit sa forme d'onde, par une technique d'échantillonnage. De ce fait, la mesure est insensible aux harmoniques qui pourraient perturber le bon fonctionnement du réseau.

Sorties opto-électroniques
 Elles permettent un découplage parfait entre les circuits internes de l'unité de contrôle et les circuits câblés par l'installateur, grâce à l'utilisation d'opto-transistors.

Sélectivité logique
 Un fil-pilote relie plusieurs disjoncteurs en cascade.
 Sur défaut terre ou court retard, le déclencheur respectera la temporisation affichée uniquement s'il reçoit le signal émis par un disjoncteur aval; sinon, le déclenchement sera instantané.
 De ce fait, le défaut est éliminé instantanément par le disjoncteur le plus proche : les contraintes thermiques subies par le réseau sont minimales, tout en assurant la sélectivité chronométrique sur l'ensemble de l'installation.

Protection de terre
 La protection de terre a pour but de protéger l'installation contre les risques d'incendies engendrés par des défauts de terre importants (ne pas confondre avec la protection des personnes).
 Deux types sont disponibles sur Masterpact :
 "residual" (T) : le déclencheur effectue la somme vectorielle des courants de phases et du neutre, s'il est distribué.
 "source ground return" (W) : le déclencheur prend directement en compte le signal d'un transformateur extérieur placé sur la prise de terre de la source.

ANNEXE D-3 Présentation de l'unité de contrôle STR 58U



protection

Les unités de contrôle STR38 et STR58 permettent de réaliser :

- la protection contre les surcharges, avec la protection long retard LR de type efficace vrai (RMS) :

- temporisation fixe pour la STR38,
- temporisation réglable pour la STR58,
- mémoire thermique;

- la protection contre les courts-circuits :

- avec la protection court-retard CR,
- choix du type I2 (On-Off),
- avec la protection instantanée haut seuil I,
- fixe pour la STR38,
- réglable pour la STR58;

- la protection "terre" :

avec sélectivité chronométrique ou logique. De type "Residual", elle peut être, sur demande, du type "Source Ground return" (option W);

- sélectivité logique :

sur protections terre et court retard (STR58).

ampèremètre

Un afficheur numérique donne en permanence la phase la plus chargée (I_{max}) et permet par pressions successives sur une touche la lecture de I1, I2, I3, Ineutre, Ihomopolaire. De plus, 3 afficheurs de type "bargraphe" permettent une lecture immédiate de la charge de chacune des trois phases.

gestion

- contrôle de charge (option R) :

fonction du réglage LR (seuil I_r), deux ordres "limite de charge" ajustables actionnent des sorties opto-découplées. Elles peuvent être exploitées pour des applications diverses : alarme, délestage, reletage, signalisation, verrouillages...;

- signalisation de défauts ;

en complément des signalisations standards de défaut (voyant et contact de dépassement de seuil LR); les déclenchements LR, CR/I, ou T sont signalés séparément en face avant par des DEL.

Une touche permet l'effacement de la signalisation après élimination du défaut.

auto-surveillance

Cette fonction d'aide à l'exploitation signale les anomalies suivantes :

- élévation anormale de température,
- disfonctionnement du microprocesseur.

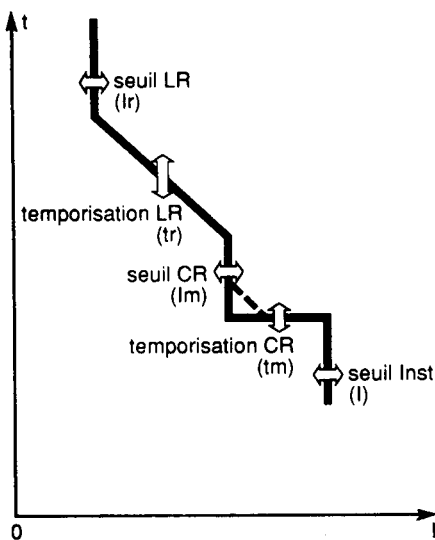
communication

2 sorties permettent de transmettre l'ensemble des informations vers les modules Dialpact

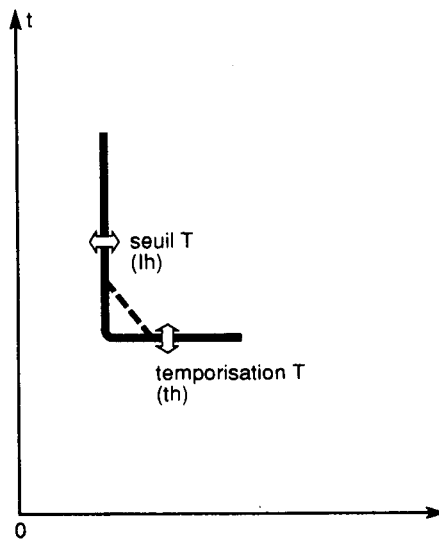
test

- par boîtier universel : vérification du déclenchement du disjoncteur;
- par mallette d'essais : vérification des fonctions protection avec déclenchement du disjoncteur.

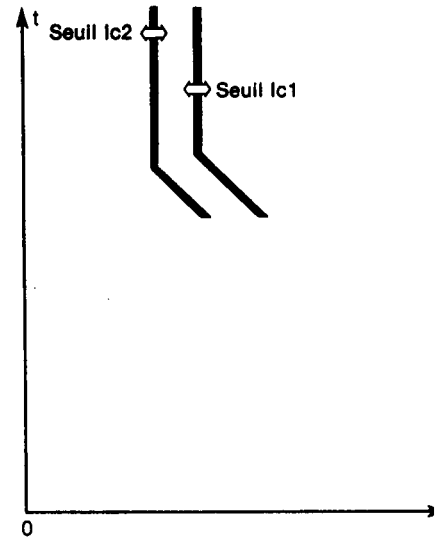
La vérification est effectuée par injection, à l'entrée de l'unité de contrôle, d'un courant simulant le défaut.



réglage des protections de surintensité



réglages de la protection de défaut terre



réglages du contrôle de charge (option R)

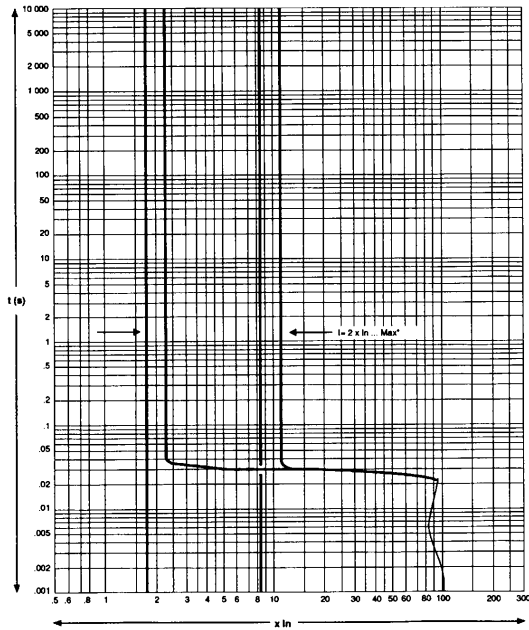
ANNEXE D-4 Description de l'unité de contrôle STR 58U

caractéristiques

unités de contrôle "RMS"	STR38S	STR58U
fonctions de base		
■ protection long retard LR		
seuil I _r (A)	I _r = I _n x...	0,8 à 1 (8 crans)
déclenchement entre 1,05 - 1,20 I _r	lo = I _n x... position OFF	0,5 à 1 (4 crans)
temporisation maximum (s)	non	sur demande
	fixe	ajustable
	tr à 1,5 I _r (s)	15 30 60 120 240 480
	tr à 6 I _r (s)	0,94 1,88 3,75 7,50 15 30
précision : + 0 - 20 %	tr à 7,2 I _r (s)	0,65 1,30 2,60 5,20 10 21
mémoire thermique (60 mn)	standard	standard + position OFF
■ protection court retard CR		
seuil I _m (A)	I _m = I _r x...	1,5 à 10 ± 15 %
temporisation (s)	cran tm avec I _{2t} OFF	0 0,1 0,2 0,3 0,4
	cran tm avec I _{2t} ON	0,1 0,2 0,3
	temps maxi de surintensité sans déclenchement (ms)	0 80 140 230 350
	temps maximum de coupure (ms)	80 140 230 350 500
■ protection instantanée I		
seuil I (A)	I = I _n x...	fixe à haut seuil (MAX*) ± 20 %
position OFF en face avant		sur types N1 et H1
■ signalisation de défaut		
déclenchement sur défaut	voyant-poussoir en face avant contact de signalisation à distance (SDE)	standard 10 A/240 V CA
dépassement de seuil LR	diode électroluminescente contact de signalisation à distance à I _r alimentation	fixe à 0,9 I _r ; clignotante à 1,05 I _r 0,1 A/240 V CA (opto découplé) à propre courant
■ auto-surveillance		
	échauffement interne	standard
fonctions en option		
■ protection "défaut terre" T ou W		
seuil I _h (A)	I _h = I _n x...	type "residual" (T) ou type "source ground return" (W) sur demande
temporisation (s)	cran t _h	0,1 à 1 200 A ⁽⁴⁾ ± 15 %
	temps maxi de surintensité sans déclenchement (ms)	0,1 0,2 0,3 0,4
	temps maximum de coupure (ms)	60 140 230 350
I _{2t} ON/OFF	sélection en face avant	140 230 350 500
■ ampèremètre (I)		
affichage entre 0,2 et 1,20 I _n	valeur de indication par histogramme des valeurs alimentation	I ₁ - I ₂ - I ₃ - I _N -I _H ⁽³⁾ ± 1,5 % ⁽¹⁾ I ₁ - I ₂ - I ₃ résolution 10 % à propre courant
■ signalisation du type de défaut (F)		
diodes électroluminescentes en face avant		déclenchement I _r - I _m /I - I _h
alimentation	avec module pile avec alimentation extérieure	pas d'alimentation extérieure par module AD
■ contact de signalisation sur type de défaut sélectionné (V)		
sortie par contact sec en fonction du type de défaut sélectionné ⁽²⁾		I _r et/ou I _m /I et/ou I _h
alimentation		par module AD
■ sélectivité logique (Z)		
contact opto-électronique		en protection court retard CR et protection terre T/W
■ contrôle de charge (R)		
seuil limite I _{c1} (A)	I _{c1} = I _r x...	0,8 à 1 (8 crans) ± 1 % ⁽⁵⁾
temporisation maximum, fixe	tr 1 à 1,5 I _{c1} = sortie par contact opto-électronique	0,5 × tr 0,1 A/240 V CA
seuil limite I _{c2} (A)	I _{c2} = I _r x...	0,5 à 1 (8 crans) ± 1 % ⁽⁵⁾
temporisation maximum, fixe	tr2 à 1,5 I _{c2} = sortie par contact opto-électronique	0,25 × tr 0,1 A/240 V CA
temporisation de retestage		fixe à 10 s
■ communication (COM)		
sorties pour transmission des données sur module Dialpact		2 sorties
valeurs transmises :	tous les réglages du déclencheur alarmes : seuil I _r , type de défaut, auto-surveillance seuils de contrôle de charge valeur des courants I ₁ , I ₂ , I ₃ , I _N	■ ■ ■
alimentation		par module AD
accessories (voir p. C20)		
(1) ajouter la précision des transformateurs internes : ± 3 %.		* MAX = I _n x... N-H L
(2) câblé en parallèle avec le bouton-poussoir d'ouverture par MX, interdit la re-fermeture du disjoncteur en fonction du type de défaut choisi.		630 A 28 14
(3) affichage permanent de la phase la plus chargée.		800-1000 A 28 10
(4) 0,2 × I _n à 1 200 A sans alimentation extérieure.		1200-1600 A 24 8
(5) précision relative à la protection long retard LR.		2000 A 20 6
		2500 A 14 6
		3000-3200 A 12 -
		4000-6300 A 10 -

ANNEXE D-5- Caractéristiques de l'unité de contrôle STR 58U

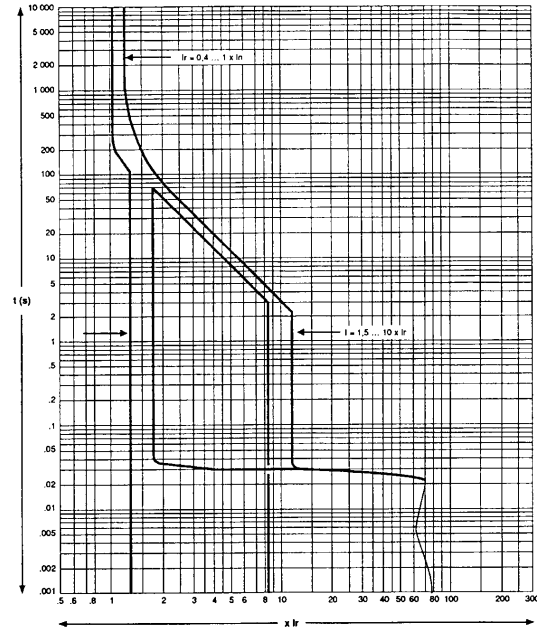
STR18M



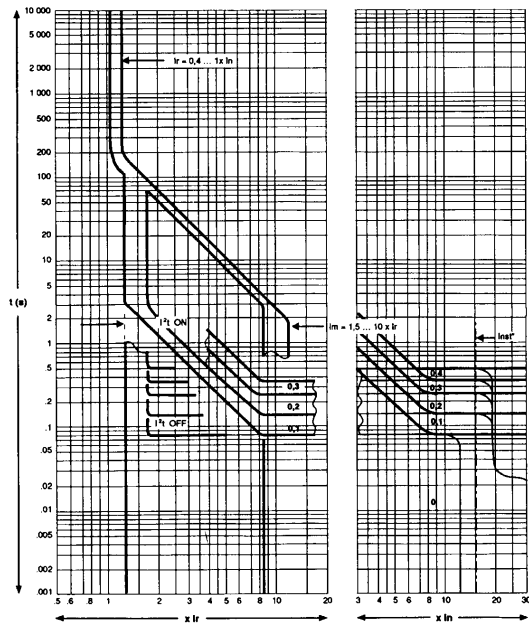
***Max**

In (A)	630/800/1000	1200/1600	2000	2500	3000/3200	4000/5000/6300
Max = In x...	28	24	20	14	12	10

STR28D



STR38S

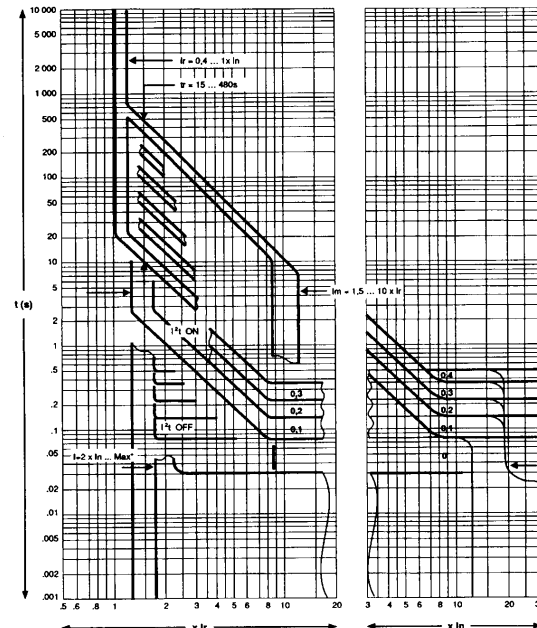


***Inst**

In (A)	630	800/1000	1200/1600	2000	2500	3000/3200	4000/5000/6300
I = In x... (N-H)	28	28	24	20	14	12	10
I = In x... (L)	14	10	8	6	6	-	-

In : calibre nominal du capteur. INST : seuil de protection instantanée.
 Ir : seuil de protection LR (tr : temporisation). Ih : seuil de protection défaut de terre
 Im : seuil de protection CR (tm : temporisation). (0-0, 1... : crans de temporisation).

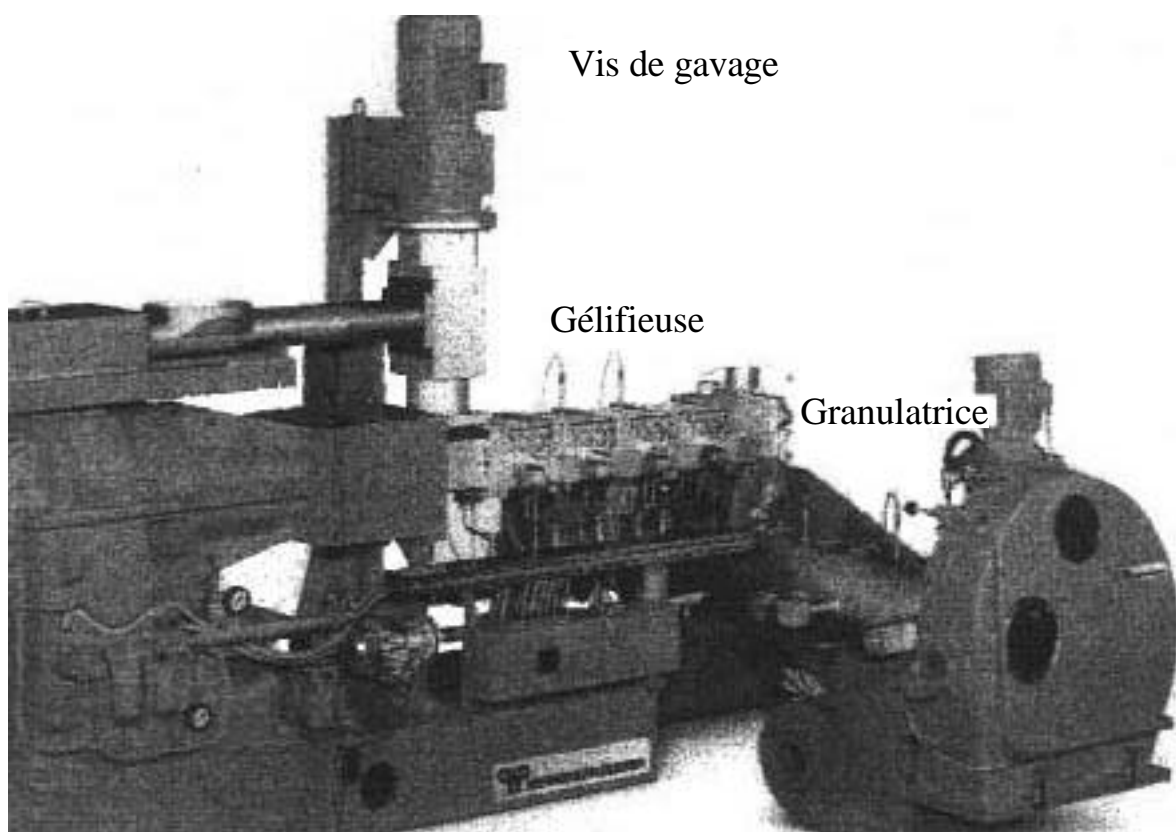
STR58U



***Max**

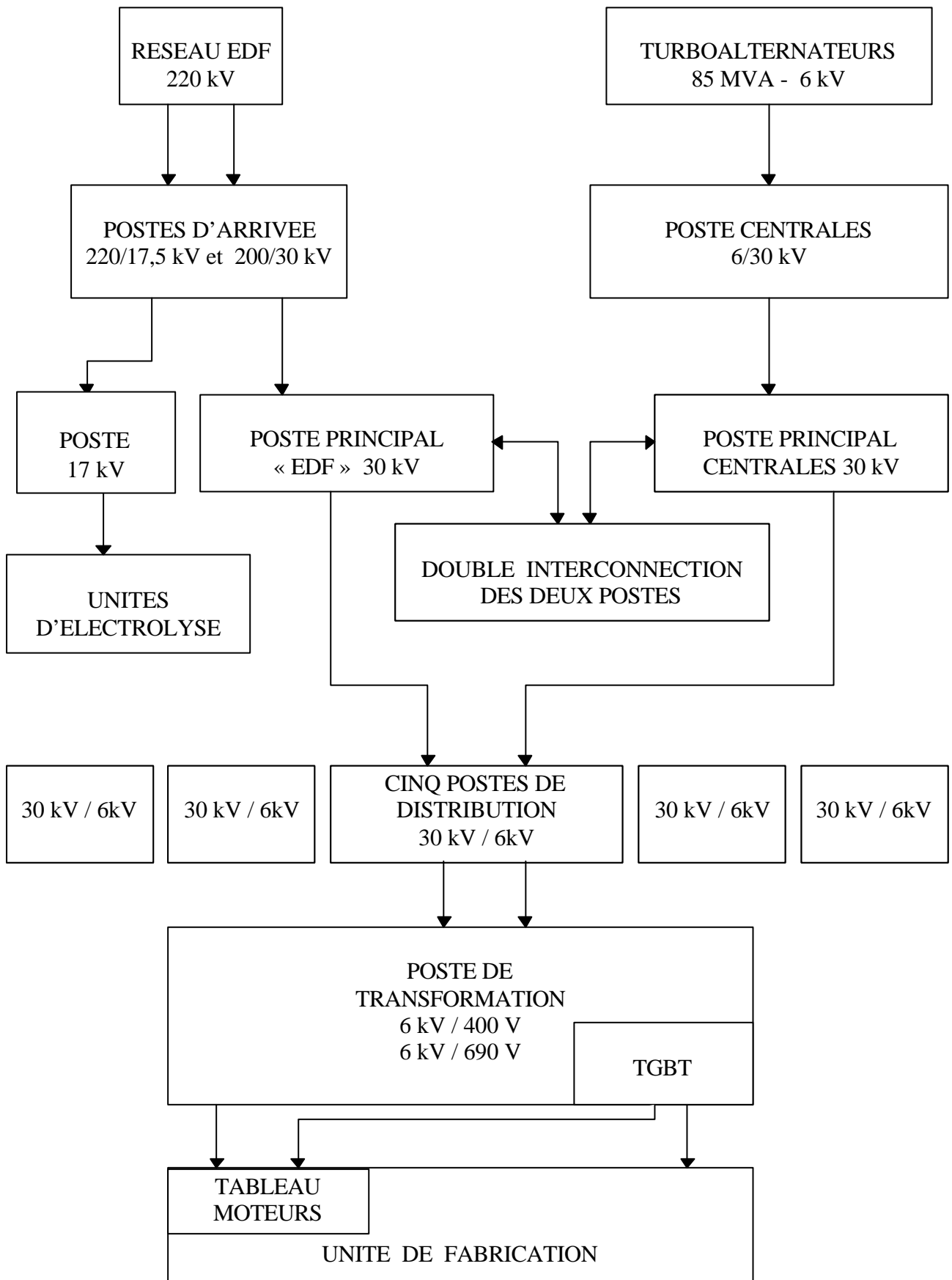
In (A)	630	800/1000	1200/1600	2000	2500	3000/3200	4000/5000/6300
Max = In x... (N-H)	28	28	24	20	14	12	10
Max = In x... (L)	14	10	8	6	6	-	-

ANNEXE D-6- Courbes de déclenchement de l'unité de contrôle STR 58U



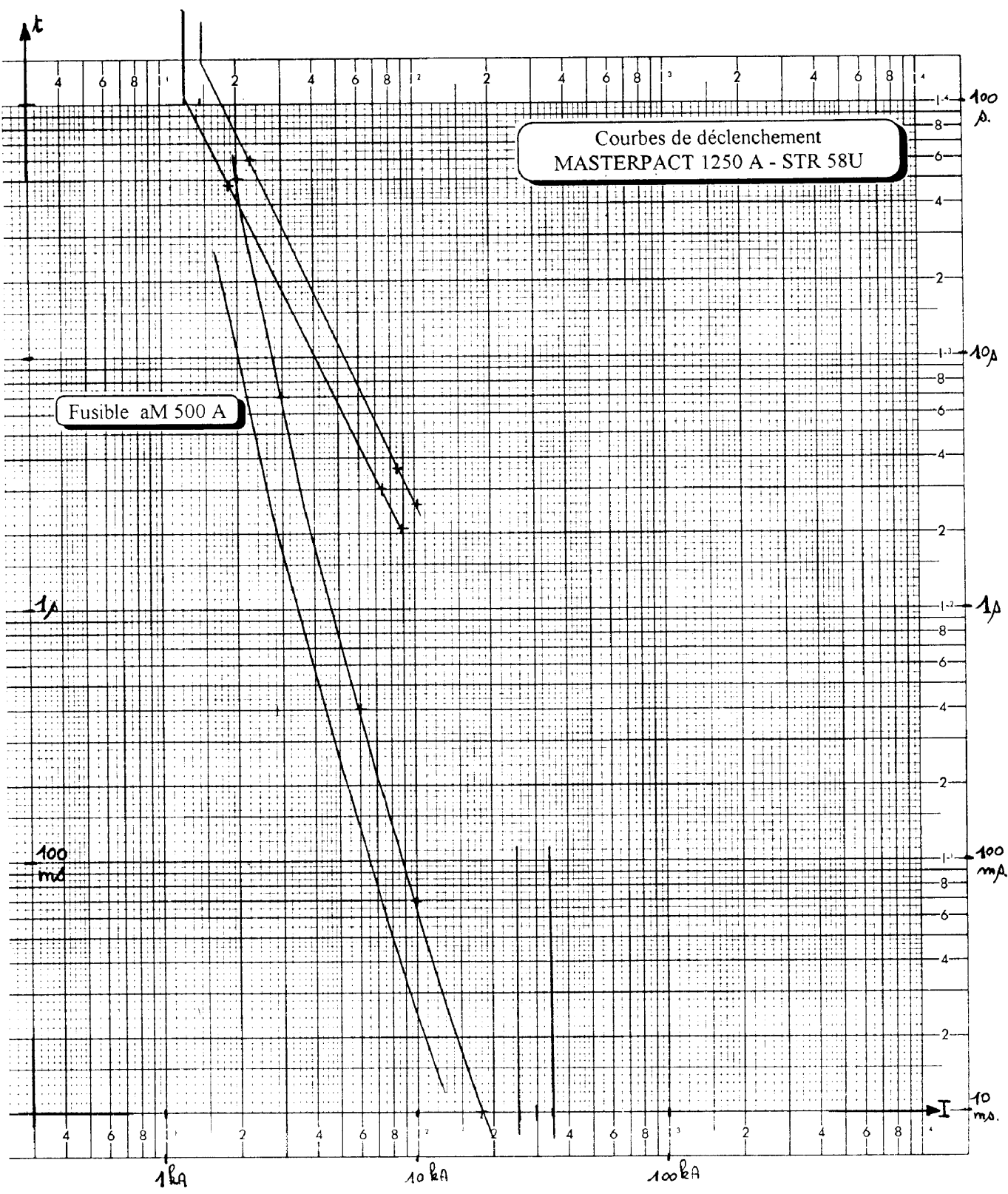
Gélifieuse granulatrice
Kombiplast 133 Werner & Pfleiderer

ANNEXE - P1 -



ANNEXE P-2 Organisation du réseau interne

DOCUMENT REponse 2



SCIENCES ET TECHNIQUES INDUSTRIELLES

CORRIGE

première partie

Etude A : Granulatrice.

A.1. Dimensionnement de l'entraînement de la vis

Question 1

$$dE_p = \dot{F}.dx = \Delta P.S.dx = \Delta P.dV = \frac{\Delta P}{\rho} = \frac{P_m - P_a}{\rho}$$

Question 2

$E_p = 4,92.10^3$ Joules / kg
 pour le débit maximum (8000kg) $E_p = 39,36.10^6$ Joules

Question 3

Le transfert de produit est horizontal

Question 4

$d_i = 8.\sqrt{pas^2 + (\Pi.d_{moy})^2} = 8.\sqrt{0,25^2 + (\Pi.0,25)^2} = 8,0824 = 6,59 \text{ m}$
 Section de l'hélice $S = 0,24.0,05 = 12.10^{-3} \text{ m}^2$
 $d_i = \sqrt{\frac{4.S}{\Pi}} = \sqrt{\frac{4.0,24.0,05}{\Pi}} = 0,124 \text{ m}$
 débit volumique $Q_v = 185.10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$
 vitesse moyenne $v = 0,154 \text{ m/s}$
 $\Re = \frac{v.d_i}{\nu} = \frac{0,154.0,124}{83,3.10^{-3}} = 0,229 \text{ reynolds}$
 $\lambda = \frac{64}{\Re} = 279$
 $J_r = \lambda.\frac{L}{d}.\frac{1}{2}.m.v^2 = 279.\frac{6,59}{0,124}.0,5.1.0,154^2 = 176 \text{ Joules}$
 $J_{rtotales} = 176.8000 = 1,41.10^6 \text{ Joules}$

Question 5

$E_c = \frac{1}{2}.m.(v_2^2 - v_1^2) = 0,5.8000.0,154^2 = 95 \text{ Joules}$

Question 6

débit volumique = $185.10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s}$
 section sortie extrudeuse $S_e = 1556.\Pi.\frac{(3.10^{-3})^2}{4} = 10,1.10^{-3} \text{ m}^2$
 vitesse des joncs $v_j = 0,183 \text{ m/s}$

Question 7

$E_f = E_c + E_p + J_s + J_r = \frac{1}{0,3}(95 + 39,36.10^6 + 1,41.10^6) = 136.10^6 \text{ Joules}$
 $P = \frac{W}{t} = 37,75 \text{ kW} \quad C = 7210 \text{ mN}$

A.2. Comportement thermique de la granulatrice

Question 8
$$P = \frac{E_c}{t_p} = \frac{45 \cdot 10^3}{90} = 500W$$

$$P = 500 \text{ W}$$

Question 9

par Thévenin

en déplaçant la source de puissance P_c entre la capacité thermique et la température T_{em}

$$T_{eq} = -T_{em} + \frac{R_{thv} \cdot T_c + R_{thc} \cdot T_v}{R_{thv} + R_{thc}} = -4^\circ$$

$$R_{eq} = \frac{R_{thc} \cdot R_{thv}}{R_{thc} + R_{thv}} = 0,12^\circ C/W$$

$$T_{eq} = -4^\circ C$$

$$R_{eq} = 0,12^\circ C/W$$

Question 10

$$C \frac{d\theta}{dt} = P_c + P$$

avec $P = \frac{T_{eq} - \theta}{R_{eq}}$

$$\theta_{(t)} + R_{eq} \cdot C_{th} \cdot \frac{d\theta}{dt} = T_{eq} + R_{eq} \cdot P_c$$

$$\tau = R_{eq} \cdot C_{th}$$

Question 11

$$\theta_{(t)} = (T_{eq} + R_{eq} \cdot P_c) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = 56 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{90}})$$

Question 12

élévation de température

$$\theta_{(90)} = 0,63 \cdot (56) = 35,3^\circ$$

$$\theta = 35,3^\circ$$

température du PVC

$$T_{matière} = T_{em} + \theta = 135,3^\circ$$

$$T_{matière} = 135,3^\circ$$

B : Commande vectorielle de la machine asynchrone.

B.1. Force magnétomotrice

Question 13

avec F force magnétomotrice dans un entrefer

$$F_{(t)} = F \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$$

$$F_{M(t)} = F \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos \theta$$

Question 14

$$F_{1M(t)} = F \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos \theta$$

$$F_{2M(t)} = F \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$F_{3M(t)} = F \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right)$$

$$F_{M(t)} = F_{M1(t)} + F_{M2(t)} + F_{M3(t)}$$

$$F_{M(t)} = F \cdot \sqrt{2} \cdot \left(\sin \omega t \cdot \cos \Theta + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(\Theta + \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(\Theta + \frac{4\pi}{3} \right) \right)$$

Question 15

$$F_{M(t)} = F \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(3 \cdot \sin(\omega t + \Theta) + \sin(\omega t - \Theta) + \sin \left(\omega t - \Theta - \frac{4\pi}{3} \right) + \sin \left(\omega t - \Theta - \frac{8\pi}{3} \right) \right)$$

$$F_{M(t)} = F \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \sin(\omega t + \Theta)$$

$$F_{M(t)} = F \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \sin(\omega t + \Theta)$$

Question 16

- Théorème de Ferraris

Une armature multipolaire, polyphasée d'espace et parcourue par des courants sinusoïdaux polyphasés équilibrés crée dans l'entrefer une force magnétomotrice circulaire unique tournante dans l'espace lié à l'armature à la vitesse $\pm \frac{\omega}{p}$.

- La distribution d'énergie électrique au début du siècle.

B.2. Mise en équation

Question 17

$$\underline{I} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{j\omega t}$$

Question 18

Origine de la création du champ propre rotorique : la Loi de Lenz. Le champ statorique, source d'un flux variable pour le rotor, provoque l'apparition de tensions induites dans les conducteurs du rotor, lesquels en court-circuit sont le siège de courants induits qui génèrent le champ rotorique.

Question 19

$$\begin{aligned} \underline{\Phi}_s &= L_s \cdot \underline{I}_s + M \cdot \underline{I}_r \\ \underline{\Phi}_r &= L_r \cdot \underline{I}_r + M \cdot \underline{I}_s \\ \underline{V}_s &= R_s \cdot \underline{I}_s + j \cdot \omega \cdot \underline{\Phi}_s \\ \underline{V}_r &= R_r \cdot \underline{I}_r + j \cdot \omega_r \cdot \underline{\Phi}_r = R_r \cdot \underline{I}_r + j \cdot g \cdot \omega \cdot \underline{\Phi}_r \end{aligned}$$

Question 20

$$M = M_o \cdot \cos \alpha$$

B.3. modèle électrique

Question 21

$$\begin{aligned} \underline{V}_s &= R_s \cdot \underline{I}_s + j \cdot \omega \cdot \left(L_s + \frac{M^2}{L_r} \right) \cdot \underline{I}_s + \frac{M}{L_r} \cdot \underline{V}_r' \\ \underline{I}_r &= \frac{\underline{V}_r'}{j \cdot \omega L_r} - \frac{M}{L_r} \cdot \underline{I}_s \end{aligned}$$

Question 22

$$\begin{aligned} \underline{I}'_r &= \frac{M}{L_r} \cdot \underline{I}_s \\ N_s &= \sigma \cdot L_s \\ \underline{V}''_s &= \frac{M}{L_r} \cdot \underline{V}'_r \end{aligned}$$

Question 23

$$\begin{aligned} L_m &= (1 - \sigma) L_s \\ R' &= \frac{(1 - \sigma)^2}{g} R \end{aligned}$$

B.4. Pilotage de la machine

Question 24

$$\begin{aligned} C_e &= \frac{p \cdot N}{a \cdot 2 \cdot \Pi} \cdot \Phi_r \cdot I \\ E &= \frac{p}{a} \cdot N \cdot n \cdot \Phi_r \end{aligned}$$

Question 25

Dans une machine à courant continu à flux inducteur constant, les grandeurs mécaniques - vitesse et couple- sont réglables de manière indépendante grâce à la quadrature -réalisée mécaniquement- entre le flux inducteur et le courant statorique. La charge impose une loi couple-vitesse et l'on peut régler par la machine entraînée soit le couple (contrôlé par le courant), soit la vitesse (contrôlée par la tension).

Question 26

$$\begin{aligned} \underline{V}''_s &= \frac{M}{L_r} \cdot \underline{V}'_r = \frac{M}{L_r} \cdot j \cdot \omega \cdot \underline{\Phi}_r = j L_m \cdot \omega \underline{I}_d \\ P_e &= 3 \cdot C_e \cdot \Omega_s = 3 \Re(\underline{V}''_s \cdot \underline{I}_q^*) = 3 \cdot \frac{M \cdot \omega}{L_r} \cdot \Re(j \cdot \underline{\Phi}_r \cdot \underline{I}_q^*) \\ C_e &= 3 \cdot p \cdot \frac{M}{L_r} \Re(j \cdot \underline{\Phi}_r \cdot \underline{I}_q^*) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{\Phi}_r &= \frac{L_r \cdot L_m}{M} \cdot \underline{I}_d = M \cdot \underline{I}_d \\ C_e &= K \cdot \underline{\Phi}_r \cdot \underline{I}_q \end{aligned}$$

Question 27 (26 bis)

Le modèle obtenu de la machine asynchrone met en évidence la quadrature obtenue entre le courant réactif I_d (source de flux inducteur) et le courant actif I_{Question} (source du couple). La machine fonctionne à couple optimal et l'on retrouve le comportement d'une machine à courant continu, c'est à dire le découplage des grandeurs mécaniques couple-vitesse dans le réglage de l'entraînement.

Etude C : Asservissement de température de la gélifieuse.

C.1. Correction proportionnelle P

Question 27

$$T_{BO(s)} = \frac{\Theta_{m(s)}}{\Theta_{c(s)}} = A_{(s)} \cdot C_{(s)} \cdot H_{(s)} = \frac{k_c \cdot k_a \cdot k_h}{(1 + \tau_a \cdot s)(1 + \tau_h \cdot s)}$$

Question 28

$$T_{BF(s)} = \frac{T_{BO(s)}}{1 + T_{BO(s)}} = \frac{k_c \cdot k_a \cdot k_h}{k_c \cdot k_h \cdot k_a + (1 + \tau_a \cdot s)(1 + \tau_h \cdot s)}$$

Question 29

$$T_{prec(s)} = \frac{1}{1 + T_{BO(s)}} = \frac{(1 + \tau_a \cdot s)(1 + \tau_h \cdot s)}{(1 + \tau_a \cdot s)(1 + \tau_h \cdot s) + k_c \cdot k_a \cdot k_h}$$

Question 30

$$\varepsilon_p = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \varepsilon(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot T_{prec(s)} \cdot \Theta_{c(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot T_{prec(s)} \cdot \frac{40}{s} = \frac{40}{k_c \cdot k_a \cdot k_h} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$k_c = 6,4$$

Question 31

$$BP = \frac{100}{6,4} = 15,62$$

Question 32

$$T_{d(s)} = \frac{H_{(s)} \cdot G_{(s)}}{A_{(s)} \cdot C_{(s)} \cdot H_{(s)} + 1}$$

Question 33

$$\varepsilon_{p(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot T_{d(s)} \cdot d_{(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot T_{d(s)} \cdot \frac{100}{s} = \frac{k_h \cdot k_d}{k_a \cdot k_c \cdot k_h + 1} \cdot 100 = 0,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Question 34

diagramme de Bode, Nyquist, Black, critère de Routh Hurwitz

Question 35

$$T_{BO(s)} = \frac{\Theta_{m(s)}}{\Theta_{c(s)}} = A_{(s)} \cdot C_{(s)} \cdot H_{(s)} = \frac{k_c \cdot k_a \cdot k_h}{(1 + \tau_a \cdot s)(1 + \tau_h \cdot s)} = \frac{80}{(1 + 10 \cdot s)(1 + 100 \cdot s)}$$

On obtient une pulsation de coupure de 0,28 rd/s ce qui correspond à une marge de phase de 20°.

Question 36

Pour obtenir une marge de phase satisfaisante de 45°, il faut réduire le gain mais la précision n'est plus assurée.

$$k_c = 1,4$$

C.2. Correction proportionnelle et intégrale PI

Question 37

$$\tau_i = 100\text{s}$$

Question 38

la correction proportionnelle intégrale annule l'erreur de précision

Question 39

$$d_{(s)} = \frac{100}{240.s^2} = \frac{0,42}{s^2}$$

Question 40

$$T_{d(s)} = \frac{H_{(s)} \cdot G_{(s)}}{A_{(s)} \cdot C_{(s)} \cdot H_{(s)} - 1} = \frac{k_h \cdot k_d \cdot (1 + \tau_a \cdot s) \cdot s}{(1 + \tau_h \cdot s)(1 + \tau_d \cdot s)(k_a \cdot k_c \cdot k_h - (1 + \tau_a \cdot s) \cdot s)}$$

Question 41

$$\varepsilon_t = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot T_{d(s)} \cdot d_{(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot T_{d(s)} \cdot \frac{0,42}{s^2} = \frac{0,42 \cdot k_d}{k_a \cdot k_c} = 0,21^\circ\text{C}$$

la précision est assurée.

C.1. Correcteur de tendance

Question 42

$$F_{(s)} = \frac{G_{(s)}}{A_{(s)}} = \frac{k_d \cdot (1 + \tau_a \cdot s)}{(1 + \tau_d \cdot s) \cdot k_a}$$

Deuxième partie.

D. Sélectivité.

D. 1.

Question 43 : Oui, le démarrage engendre une pointe de 6,2 In.

$$I_n = 376 \text{ A} ; I_d = 2,33 \text{ kA.}$$

Le temps de coupure du fusible (voir DR 2 : 500 A aM) pour 2,3 kA vaut 5 s à chaud et 12 s à froid.

Question 44 : LR (long retard) : analogue à une protection thermique (courant noté I_r).

CR (court retard) : semblable à une protection magnétique instantanée (courant noté I_m).

I_{nst} (instantanée) : équivalent à une protection magnétique retardé (courant noté I).

Question 45 :

Protections	Éléments protégés	Défauts	Commentaires
Fusible aM.	Equipement moteur	Courts-circuits	Supporte le courant de démarrage.
LR (I _r).	Câbles, le moteur a son propre relais de protection.	Surcharges	Défauts de faible amplitude.
CR (I _m).	Installation.	Élimination rapide des courts-circuits les plus faibles.	Sélectif avec fusible aM.
Inst (I).	Installation.	Élimination très rapide des courts-circuits les plus forts.	Rapidité compatible avec la tenue thermique.

D . 2 .

Question 46 : Intensité de fusion maxi pour 0,3 s = 6,4 kA (voir DR 2)

$$I_m = 1,25 \times 6,4 \text{ kA} = 8 \text{ kA.}$$

Sur le document DR 2 la plage de déclenchement I_r est comprise entre 1,2 et 1,5 kA. Protection LR (doc. D 5) déclenchement entre 1,05 et 1,20 I_r.

$$\text{Soit } I_r \times 1,05 = 1200 \text{ A et } I_r \times 1,20 = 1500 \text{ A.}$$

$$\text{D'où : } 1150 \text{ A} < I_r < 1250 \text{ A ; soit } I_r \approx 1200 \text{ A.}$$

A partir de la doc. D 5.

- Courant assigné : I_n = 1 250 A (soit I_o = I_n x 1 ; 4 crans 0,5 ou 0,62 ou 0,8 ou 1).
- Protection long retard LR : I_r = I_o x 0,95 (soit 1 250 A x 0,95 = 1 190 A ; 8 crans 0,8 ou 0,88 ou 0,9 ou 0,92 ou 0,98 ou 1).
- Valeur du coefficient k = 8 000/1 190 = 6,7 ; (≈ 7).

Question 47 : voir DR 2.Plage de déclenchement court retard : I_m ± 15 % ; soit 6,8 à 9,2 kA

Plage du temps de déclenchement CR (cran 300 ms) de 230 à 350 ms.

Question 48 : L'option I²t est indispensable.

Sans l'option (pas de sélectivité totale) :

- fusible (230 ms ; 7 kA) et DJ2 (230 ms ; 6,8 kA).

Avec l'option (sélectivité de 2,2 kA) :

- fusible (230 ms ; 7 kA) et DJ2 (230 ms ; 9,2 kA).

Remarque : la sélectivité est minimale pour le point (6,8 kA ; 350 ms) pour l'augmenter prendre un coefficient k de 7.

E . Concept de sûreté.

E . 3 .

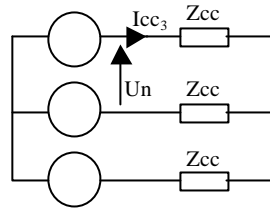
Question 49 :

$$J_{cc} = I_{cc}$$

$$S_{cc} = 3 \cdot Z_{cc} \cdot I_{cc}^2$$

$$I_{cc3} = S_{cc} / \sqrt{3} U_n$$

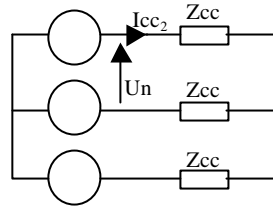
$$= U_n / \sqrt{3} Z_{cc} = V_n / Z_{cc}$$



Question 50 :

$$I_{cc2} = U_n / 2Z_{cc}$$

$$= I_{cc3} \cdot (\sqrt{3}/2)$$



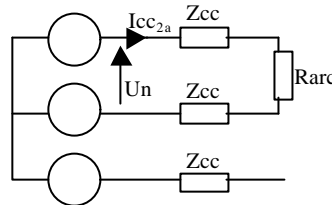
$$I_{cc2a} = U_n / (2 \cdot Z_{cc} + R_{arc})$$

$$= k \cdot U_n / (2 \cdot Z_{cc})$$

$$= k \cdot I_{cc3} \cdot (\sqrt{3}/2)$$

$$k = 1/\sqrt{3}$$

$$I_{cc2a} = I_{cc3} / 2$$



E . 4 .

Question 51 : Z_{12} minimale pour S_{cc} maximale.

$$Z_{12} = (U_{2n})^2 / S_{cc} = 400^2 / 190 \cdot 10^6 = 0,85 \text{ m}\Omega$$

Question 52 : Remarque : puissance assignée du transformateur = $U_{20} \cdot I_{2n}$.

$/\sqrt{3}$.

$$Z_{TR1} = U_{cc\%} \cdot (U_{2n})^2 / S_n = 6\% \cdot 400^2 / 1600 \cdot 10^3 = 6 \text{ m}\Omega$$

Question 53 : $Z_A(\text{mini}) = Z_{12} + Z_{TR1} + Z_L = 0,85 + 6 + 0,9 = 7,8 \text{ m}\Omega$.

$$I_{CCA} = 400 \cdot 10^3 / 7,8 \cdot \sqrt{3} = 29,6 \text{ kA}$$

Puissance de court-circuit en A :

$$S_{CCA} = (U_{2n})^2 / Z_A = 400^2 \cdot 10^3 / 7,8 = 20,5 \text{ MVA}$$

Question 54 : Le pouvoir de coupure de DJ2 est de 65 kA le disjoncteur M12-H1 convient.

Le réglage en usine, du seuil instantané du disjoncteur DJ2 est de 24 fois I_n avec une plage $\pm 15\%$; soit $(24 \times 1250 \text{ A}) \pm 15\% = 30 \text{ kA} \pm 15\%$; (de 25,5 à 34,5 kA).

Un défaut en A de 29,6 kA risque de ne pas être pris en compte. Il convient de demander un réglage usine de $29,6 \text{ kA} / 1,15 = 25,7 \text{ kA}$ soit $I/I_n = 25,7/1,25 = 20,6$ soit un réglage d'usine de $20 I_n$.

Question 55 : $Z_{\text{ALU}} = 200 \times 0,09 = 18 \text{ m}\Omega$.

Question 56 : Le court-circuit minimum prend en compte l'impédance maximale Z_{12} c'est-à-dire la puissance de court-circuit minimale.

$$Z_{12\text{maxi}} = (U_{2n})^2 / S_{\text{ccmini}} = 400^2 / 82 \cdot 10^6 = 1,95 \text{ m}\Omega$$

$$Z_B = Z_{12\text{maxi}} + Z_{\text{TR1}} + Z_L + Z_{\text{ALU}} = 1,95 + 6 + 0,9 + 18 = 26,8 \text{ m}\Omega$$

$$I_{\text{CC3B}} = U_{2n} / Z_B \cdot \sqrt{3} = 400 / 26,8 \cdot \sqrt{3} = 8,6 \text{ kA}$$

$$I_{\text{CC2B}} = I_{\text{CC3B}} / 2 = 4,3 \text{ kA}$$

E . 5 .

Question 57 : Voir DR 2. Le disjoncteur M12-H1 tient :
(65 kA ; 0,5 s) ; (50 kA ; 1 s) ; (32 kA ; 3 s).

$$\text{Soit } I^2t = 2\,112 \text{ kA}^2 \cdot \text{s} ; 2\,500 \text{ kA}^2 \cdot \text{s} ; 3\,072 \text{ kA}^2 \cdot \text{s}$$

Question 58 : DJ1 doit être en mesure, selon le principe de réserve, de couper un défaut de 4 kA tout en restant sélectif vis à vis de DJ2. DJ1 coupe avant que DJ2 atteigne sa limite en tenue thermique. Voir DR 2.

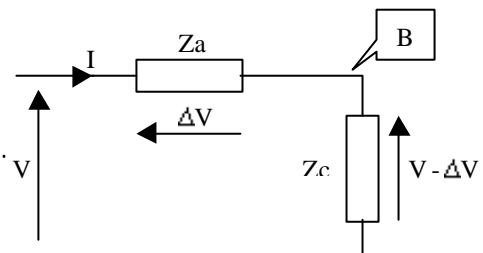
Par exemple : DJ2 instantané pour 32 kA et DJ1 en 0,5 s ; DJ2 en 18 s pour 4 kA et DJ1 en 40 s.

F . Chutes de tension.

F . 1 .

Question 59 : $Z_a = V_n^2 / S_{\text{cc}} \approx V^2 / S_{\text{cc}}$.

$$Z_a = V_n^2 / S_n \approx V^2 / S_n$$



$$\Delta V = Z_a \cdot I ; V = (Z_a + Z_c) I ; \Delta V / V = Z_a / (Z_a + Z_c)$$

$$X_a \ll X_c ; R_a \ll X_a ; R_a \ll R_c$$

$$\Delta V / V \approx \Delta V / V = (V_n^2 / S_{\text{cc}}) / (V^2 / S_{\text{cc}} + V_n^2 / S_n) = S_n / (S_n + S_{\text{cc}})$$

$$S_n \ll S_{\text{cc}} ; \Delta V / V = S_n / S_{\text{cc}}$$

Système équilibré : $V / V = \Delta U / U$.

F . 2 .

Question 60 : Au démarrage, chute de tension en A : $(\Delta U / U)_A = S_{\text{nd}} / S_{\text{cc}}$.

$$S_{\text{nd}} = 220 \text{ kW} (I_d / I_n) / (\cos \varphi \cdot \eta) = 1\,615 \text{ kVA}$$

$$\text{ou } S_{nd} = 400 \cdot \sqrt{3} \cdot 6,2 \text{ In}$$

$$(\Delta U/U)_A = 1\,615 / 25 \cdot 10^3 = 6,5 \%$$

$$(\Delta U/U)_B = 1\,615 / 7 \cdot 10^3 = 23 \%$$

Question 61 : Chutes de tension en fonctionnement nominal.

$$\text{Calcul de } S_n = 220 \cdot 10^3 / (0,88 \times 0,96) = 260 \text{ kVA.}$$

$$(\Delta U/U)_A = 260 / 25 \cdot 10^3 = 1,04 \%$$

$$(\Delta U/U)_B = 260 / 7 \cdot 10^3 = 3,7 \%$$

Question 62 : Au démarrage chute de tension en amont.

$$(\Delta U/U)_{\text{AMONT}} = 1\,615 / 190 \cdot 10^3 = 0,85 \%$$

Question 63 : Pas de perturbations lors du fonctionnement nominal du moteur, sur le réseau 400 V, lors du démarrage les équipements connectés au niveau du point B et sensibles aux baisses de tension seront perturbés. Une solution consiste à les connecter au niveau du point A. Le réseau 6 kV n'est pas perturbé car la puissance du transfo est très supérieure à celle du moteur.

F . 3 .

Question 64 : Transformateur avec une grande inductance de fuite au secondaire, pendant le démarrage la tension chute et limite le courant de démarrage. Pour obtenir un meilleur rendement il convient de procéder à un relèvement du facteur de puissance.

Question 65 : Avec $U_{cc} = 8 \%$; $Z_{\text{bloc}} = 8 \%$. $400^2 / 315 \cdot 10^3 = 40,6 \text{ m}\Omega$.

$$Z_A = Z_{12} + Z_{\text{bloc}} + Z_L = 40,6 + 0,85 + 0,95 = 42,4 \text{ m}\Omega$$

Puissance de court-circuit en A :

$$S_{\text{CCA}} = (U_{2n})^2 / Z_A = 400^2 \cdot 10^3 / 42,4 = 3,8 \text{ MVA.}$$

Nouvelle puissance au démarrage : $I_d / I_n = 65 \%(6,2) = 4,03$; $S_d = 4 \cdot 260,4 \text{ kVA.}$

$$(\Delta U/U)_{\text{A,BLOC}} = 4 \cdot 260,4 / 3,8 \cdot 10^3 = 30,6 \%$$

Remarque : les autres impédances peuvent être négligées.

Question 66 : Possibilité de maîtriser, par la chute de tension, le courant de démarrage en appairant le transfo-bloc au moteur ; ceci nécessite une ligne (400 V) et un transformateur dédié à un départ moteur. Les appareils de protection sur ce type de départ sont de performance moindre (S_{cc} réduite). La solution décrite en D1 est néanmoins plus économique un transformateur pour plusieurs départs en prenant soin de bien choisir le point de connexion des équipements sensibles.

G . Tenue thermique.

G . 1 .

Question 67 : $d\theta = dW/(M.C)$.

M : masse du conducteur (kg) ; C : chaleur massique (J/°C.kg) ; $d\theta$: échauffement pendant un temps dt (°C) ; dW : variation d'énergie (J).

Question 68 : $dW = R.I_{eff}^2.dt$; (J, Ω , A, s).

Question 69 : $d\theta = dW/(M.C) = R.I_{eff}^2.dt / M.C$

$$\Delta\theta = (I_{eff} / S)^2 . t/k^2 = t . (I_{eff} / kS)^2$$

La résistance, la valeur efficace du courant et la capacité thermique sont considérés constantes alors qu'en réalité la résistance et la capacité thermique varient avec la température et que le forme du courant varie en fonction de la résistance du défaut. «La courbe $\theta = f(t)$ est assimilée à la tangente à son origine».

G . 2 .

Question 70 : $\Delta\theta.S^2 . k^2 = I_{eff}^2 . T = 130 . 1\,000^2 . 8,5^2 = 9\,400.10^6 A^2 . s$

Soit : (0,3 s ; 177 kA) ; (1 s ; 97 kA) ; (5 s ; 43 kA). Voir DR 2.

CORRIGE du DOCUMENT REPONSE 2

