

ETUDE D'UN SYSTEME TECHNIQUE ET/OU D'UN PROCESSUS TECHNIQUE ET/OU D'UN EQUIPEMENT

ELEMENTS DE CORRIGE

PARTIE I

I.1) En situation normale, le site est alimenté par l'arrivée EDF 90 kV à travers le transformateur TR412 de 15 MVA vers le poste de livraison n°1.

En cas de travaux ou d'avaries sur ce transformateur et si la chaudière électrique n'est pas indispensable, elle est mise hors tension et le site est alimenté par le transformateur TR411 de 40 MVA.

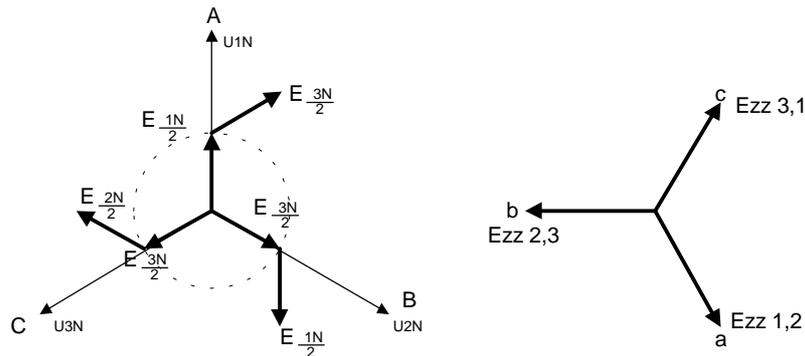
Si la chaudière est indispensable ou si le 90 kV est absent, le site est alimenté par l'arrivée EDF 15 kV (coupure d'artère) du poste de livraison secours n°12.

En cas de perte simultanée du 90 kV et du 15 kV, le site est alimenté par la turbine à gaz de 8,5 MVA et / ou par le groupe électrogène de 1 MVA.

I.2) Voir Document Corrigé I.1 (folio 4/5bis).

I.3) Voir Document Corrigé I.2 (fiche de manœuvre).

I.4)



Couplage Yz_n 5

- Y → étoile au primaire
- Z → zigzag au secondaire
- n → neutre sorti au secondaire
- 5 → indice horaire 150° ou 5Heures

I.5) Protection contre les perturbations extérieures :

- Atmosphériques **parafoudres, éclateurs**
- Courts circuits ou surcharges **fusibles ou disjoncteurs**

I.6) Surveillance du fonctionnement du transformateur :

- Contrôle de la température du diélectrique : **thermomètre**
Thermostats
- Contrôle du diélectrique (niveau et dégagements gazeux) :
 - Transfo dit « respirant » **relais Buchholz**
 - Transfo à remplissage intégral **relais DG, DGP, DGPT***

(* Détection Gaz Pression Température)

I.6) Pour que la mise en parallèle des transformateurs soit possible il faut :

- que les différents appareils soient alimentés par le même réseau,
- que les rapports de transformation soient identiques ($\pm 0,5\%$),
- que leurs tensions de court-circuit soient égales ($\pm 10\%$),
- que leurs puissances soient relativement proches,
- que leurs couplages soient compatibles avec :
 - même indices horaires,
 - indices horaires appartenant à un même groupe.

I.7) La sélectivité, c'est la coordination des dispositifs de coupure automatique pour qu'un défaut soit éliminé par le disjoncteur placé immédiatement en amont du défaut et lui seul.

Sélectivité ampèremétrique :

Le décalage des courbes de déclenchement (ou de fusion) est un décalage en intensité, cette sélectivité peut-être totale (les courbes ne se chevauchent pas) ou partielle (les courbes se chevauchent).

Sélectivité chronométrique :

Le décalage des courbes de déclenchement (ou de fusion) est un décalage dans le temps.

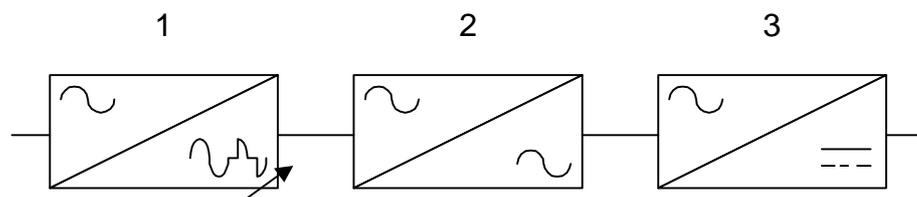
Filiation :

La filiation consiste à utiliser le pouvoir de limitation des disjoncteurs situés en amont dans une installation. Les disjoncteurs amont jouent un rôle de barrière pour les forts courants de court-circuit. Cela conduit à utiliser des disjoncteurs aval possédant un pouvoir de coupure inférieur au courant de court-circuit présumé en leur point d'installation dans leurs conditions normales de coupure. La limitation du courant se faisant tout au long du circuit contrôlé par le disjoncteur amont.

II.1) Le transformateur est couplé en triangle au primaire et dispose de deux secondaires couplés en étoile avec bobine d'interphase.

II.2) Le courant de sortie est continu fabriqué à partir d'un redresseur triphasé à bobines d'interphase, la forme d'onde est donc de six sommets d'alternances positives sur une période de 20 ms, semblables à un redressement hexaphasé.

II.3)



1 → Gradateur à angle de phase réglant U efficace en fonction de α l'angle de retard à l'amorçage des thyristors,

2 → Transformateur adaptant la tension efficace,

3 → Redresseur fixe pour obtenir une tension redressée.

II.4) D'après le Document Ressource II.5 :

$$I_D \text{ moy} = I_{RC} \text{ moy} / 6 = 15\,000 / 6 = 2\,500 \text{ A}$$

$$I_D \text{ max} = 0,525 \cdot I_{RC} \text{ moy} = 0,525 \times 15\,000 = 7\,875 \text{ A}$$

DOCUMENT CORRIGE I.2

RHÔNE POULENC CHIMIE USINE DE LA ROCHELLE Rue Chef de Baie 17041 LA ROCHELLE CEDEX 1		FICHE DE MANŒUVRE N° C15-02	Date de rédaction : 13/01/1991 Modifiée le : 08/08/1995 Établie par : JM BEAUSSY Consignation du :/..... Fichier n° :
OUVRAGE À CONSIGNER		CONSIGNATION DU CÂBLE HTA N°15 (entre les cellules 1143 du poste 114 et 636 du poste 63)	
Manœuvres, condamnations, vérification de l'absence de tension, mise à la terre et en court-circuit, etc.... à effectuer dans l'ordre et pointées après exécution.			
N°	Emplacement de la manœuvre	DESIGNATION DE L'OPERATION	Pointage après exécution
1		LA CONSIGNATION DU CABLE N°15 NE PEUT S'EFFECTUER QU'APRES LA MANŒUVRE D'EXPLOITATION M15-06	
2	POSTE N°114		
3	CELLULE 1143	OUVERTURE de l'INTERRUPTEUR I1143 .	
4		CONDAMNER OUVERT l'interrupteur I1143 , RETIRER la CLEF n° 32 , POSER le cadenas 333 et le disque de condamnation.	
5		VERIFICATION VISUELLE de l'ouverture des pôles de l'interrupteur I1143 .	
6		TRANSFERT de la CLEF n° 32 sur le sectionneur de terre ST636 au POSTE N° 63 .	
7	POSTE N°63		
8	CELLULE 636	OUVERTURE de l'INTERRUPTEUR I636 .	
9		CONDAMNER OUVERT l'interrupteur I636 , RETIRER la CLEF n° 33 , POSER le cadenas 333 et le disque de condamnation.	
10		VERIFICATION VISUELLE de l'ouverture des pôles de l'interrupteur I636 .	
11		VERIFICATION de L'ABSENCE DE TENSION au point A (Diviseurs capacitifs).	
12		DEVERROUILLER le SECTIONNEUR DE TERRE ST636 .	
13		FERMETURE DU SECTIONNEUR DE TERRE ST636 .	
14		CONDAMNER FERME LE SECTIONNEUR DE TERRE ST636 .	
15		TRANSFERT de la CLEF n° 33 sur le sectionneur de terre ST1143 au POSTE N° 114 .	
16	POSTE N°114		
17	CELLULE 1143	VERIFICATION de L'ABSENCE DE TENSION au point B (Diviseurs capacitifs).	
18		DEVERROUILLER le SECTIONNEUR DE TERRE ST1143 .	
19		FERMETURE DU SECTIONNEUR DE TERRE ST1143 .	
20		CONDAMNER FERME LE SECTIONNEUR DE TERRE ST1143 .	
21		EFFECTUER LA MISE A LA TERRE ET EN COURT-CIRCUIT.	
22		REMETTRE AU CHARGÉ DE TRAVAUX L'ATTESTATION DE CONSIGNATION.	
23		ACCES POSSIBLE AUX TÊTES DE CÂBLES aux points C et D .	

II.5) Pour déterminer le calibre des fusibles, il faut connaître le courant circulant dans les enroulements primaires du transformateur,

Calculons d'abord la puissance nécessaire au primaire $S = 1,05 U_{RC} \text{ moy } I_{RC} \text{ moy}$

$$S = 1,05 \times 15 \times 15\,000 = \mathbf{236\,250\,VA}$$

De plus $S = U \times I \times \sqrt{3}$ donc $I = 236\,250 / (400 \times \sqrt{3}) = \mathbf{341\,A}$

Ce courant est le courant en ligne, il faut le courant dans un enroulement :

$$J = I / \sqrt{3} = 341 / \sqrt{3} \quad \mathbf{J = 197\,A}$$

II.6) Lorsque l'angle de retard à l'amorçage des thyristors est 0° , la tension efficace au primaire est de 400 V on obtient alors 15 V moyen au secondaire.

En partant du principe que le transformateur et les diodes sont parfaits, on peut dire que :
pour obtenir $U_{RC} \text{ moy} = 15\,V$ il faut $U_{SEC} \text{ eff} = 0,85 U_{moy} = 12,75\,V$,

$$U_{SEC} \text{ eff} / U_{PRI} \text{ eff} = \text{constante} = 12,75 / 400 = \mathbf{0,031875}$$

pour $U_{RC} \text{ moy} = \mathbf{14\,V}$ il suffit d'un $U_{SEC} \text{ eff} = \mathbf{11,9\,V}$,

$$\text{donc } U_{PRI} \text{ eff} = 11,9 / 0,031875 = \mathbf{373,3\,V},$$

PARTIE II

A l'aide du tableau « U_{eff} / U_{max} » on obtient un coefficient de :

$$373,3 / (400 \times \sqrt{2}) = \mathbf{0,66}$$

Cela donne un angle de retard à l'amorçage d'environ $\mathbf{50^\circ}$

Vérifions à l'aide de $(U_{eff}^2 = 1/T \int_0^T U_{max}^2 \cdot \sin^2 x \cdot dx)$ qui permet d'écrire :

$U_{eff} = U_{max} / \sqrt{2} \cdot \sqrt{(1 - \alpha/\pi + \sin 2\alpha/2\pi)}$ où α est l'angle de retard à l'amorçage des thyristors.

Pour $\alpha = 51^\circ$, $U_{eff} = 373,6\,V$ très proche des $373,3\,V$ déterminés.

II.7) Le premier module encadré « IC2 » est un opto-coupleur assurant une isolation galvanique des circuits. Le second module est un circuit astable à porte logique NAND (trigger) déclenchable qui assure la fabrication du signal d'impulsion de gâchette du thyristor commandé. Le train d'impulsions est transmis au thyristor par Q1 et T2.

II.8) Le signal d'entrée est adapté en valeur puis est transmis à un convertisseur tension-fréquence. Le signal, de fréquence proportionnelle à la tension d'entrée, « attaque » la diode d'un photo-coupleur.

Le photo-transistor récupère ce signal et l'applique à l'entrée d'un convertisseur fréquence-tension. En sortie, on obtient un signal image du signal d'origine en ayant assuré un isolement galvanique ou séparation des potentiels électriques. Les deux signaux n'ont aucun potentiel commun.

Ce type de module permet justement de transmettre des signaux en effectuant cette séparation des circuits utile pour éviter les bouclages et autres courants de retour néfastes au bon fonctionnement de l'ensemble de l'équipement.

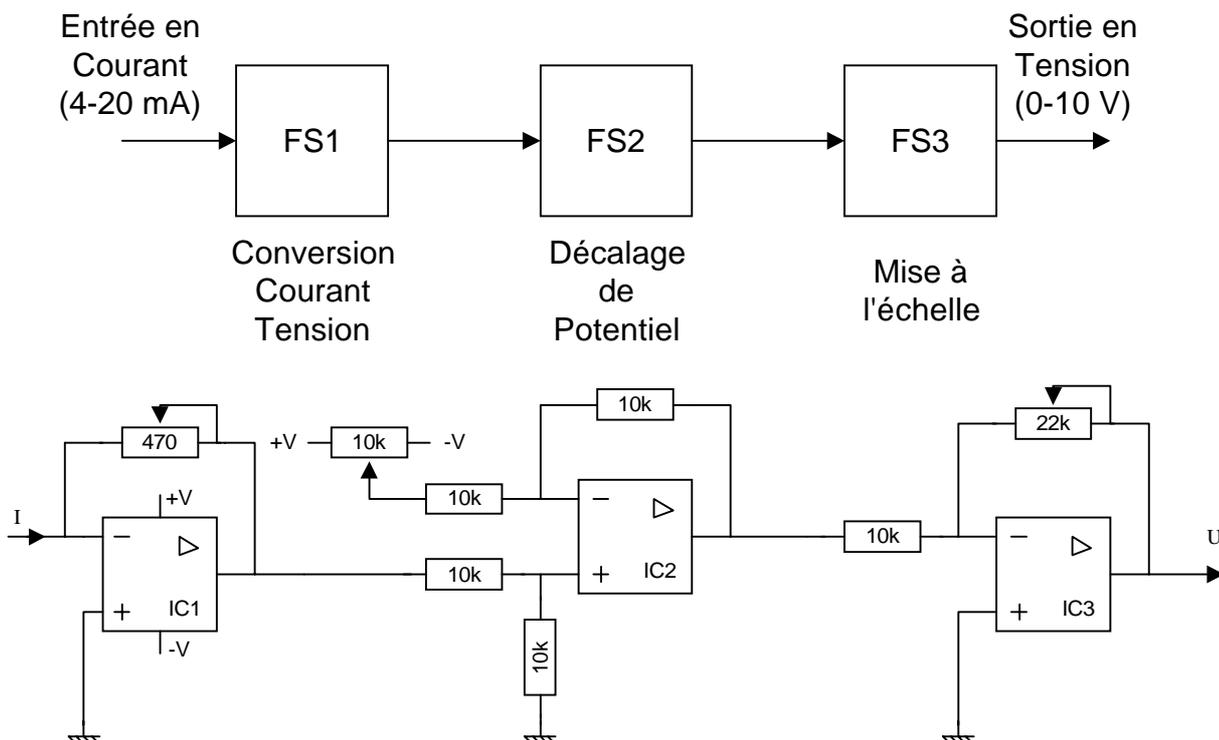
II.9) Structure possible en Document Corrigé II.1

La liaison 0-10 V permet une mise en place rapide et simple. Mais dans les installations industrielles, électromagnétiquement fortement polluées, il est indispensable de disposer d'une liaison « sûre » et fonctionnant sur des longueurs non négligeables.

La liaison 4-20 mA permet :

- de s'affranchir de la longueur de la liaison en n'étant pas sensible à la chute de tension en ligne,
- de détecter d'éventuels problèmes (câble pincé ou sectionné) car toute consigne reçue en dehors des 4-20 mA est considérée comme erronée.

DOCUMENT CORRIGE II.1



La fonction FS1 de conversion courant tension (inverseur) est assurée par le circuit IC1, la résistance ajustable de 470 Ω est réglée sur 350 Ω pour obtenir 7 V à 20 mA.

La fonction FS2 de décalage de potentiel est assurée par le circuit IC2, montage soustracteur. La tension appliquée à la « patte moins (-) » de l'ACIL doit être réglée à -1,4 V pour supprimer le décalage de -1,4 V (dû aux 4 mA). On obtient alors en sortie un signal évoluant entre 0 et - 5,6 V pour -1,4 V à -7 V en entrée.

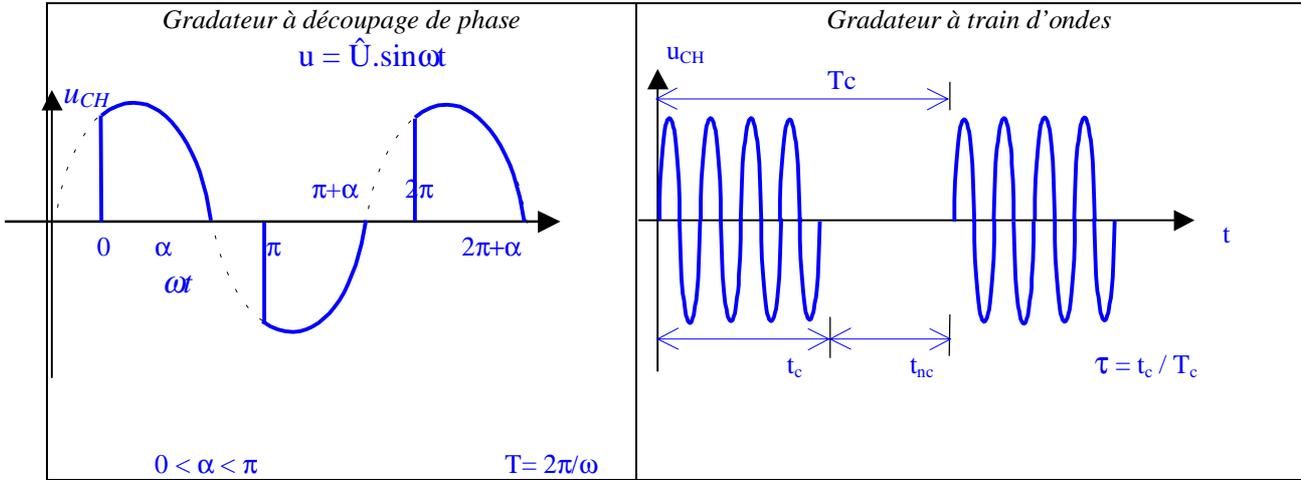
La fonction FS3 de mise à l'échelle est assurée par le circuit IC3, montage amplificateur inverseur dont la résistance ajustable de 22 k Ω est réglée pour obtenir 10 V en sortie avec -5,6 V en entrée soit environ 17,8 k Ω .

Partie III

Document Corrigé III.1

1- Etude théorique des formes d'ondes

1.1- Forme de l'onde de tension



Quest.1.2- Expression de la valeur efficace de la tension aux bornes de la charge résistive

Gradateur à découpage de phase	Gradateur à train d'ondes
$U_{ch}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt$ $U_{ch}^2 = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} (U \cdot \sin \omega t)^2 dt$ $U_{ch} = U \cdot \sqrt{1 - (\alpha/\pi) + (\sin 2\alpha)/2\pi}$	$U_{ch}^2 = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} u(t)^2 dt$ $U_{ch}^2 = \frac{1}{T_c} \int_0^{t_c} (U \cdot \sin \omega t)^2 dt$ $U_{ch} = U \cdot \sqrt{t_c / T_c}$
	$\omega = 2\pi / T_{réseau}$ $t_c = n \cdot T_{réseau}$

2-Alimentation des éléments chauffants

CODIFICATION

TC 2040 _ 02 _ 250A _ 440V _ 240V _ 0V10 _ 00 _ PLU _ 00

Phases contrôlées (triphase) ; U = 400 V ; alim. aux. V = 230 V ; entrée A commande 0-10V ; pas d'entrée B ; détection déséquilibre de phases.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{109 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 400} = 159 \text{ A}$$

(Justifications)

2.1- Choix du gradateur de puissance

2.2- Réglage de puissance

Compléter le tableau suivant : (préciser formules, applications num. et unités)

PUISSANCE DISTRIBUEE	DUREE DE CYCLE	TEMPS DE CONDUCTION	TAUX DE CONDUCTION
$P = \tau \cdot P_{max}$ $P = 0,5 \times 109$ $P = 54,4 \text{ kW}$	T = 600 ms	$t_c = \tau \cdot T$ $t_c = 0,5 \times 600$ $t_c = 300 \text{ ms}$	$\tau = 50 \%$
$P = \tau \cdot P_{max}$ $P = 0,01 \times 109$ $P = 1,09 \text{ kW}$	T = 12 s	$t_c = \tau \cdot T$ $t_c = 0,01 \times 12$ $t_c = 0,12 \text{ s}$	$\tau = 1 \%$

Document Corrigé III.2

3- Commande de l'allure de chauffe / acquisition de la température

Température	F.E.M. (thermocouple)	Valeur analogique
$\theta_1 = 290 \text{ }^\circ\text{C}$	$E_1 = 0,041 \times 290$ $E_1 = 11,89 \text{ mV}$	$I_1 = \frac{(20-4) \cdot E}{41} + 4$ $I_1 = (16 \times 11,89)/41 + 4$ $I_1 = 8,64 \text{ mA}$
$\theta_2 = 730 \text{ }^\circ\text{C}$	$E_2 = 0,041 \times 730$ $E_2 = 29,93 \text{ mV}$	$I_1 = \frac{(20-4) \cdot E}{41} + 4$ $I_1 = (16 \times 29,93)/41 + 4$ $I_1 = 15,68 \text{ mA}$

3.1- Compléter les tableaux ci-dessous : Avec plage de température : 0 à 1 000 °C

Allure de chauffe	Puissance transmise	Valeur analogique	Valeur décimale (régulateur 8 bits)
X = 20 %	$P_1 = 0,2 \times 10^9$ $P_1 = 21,8 \text{ kW}$	$V_1 = 0,2 \times 10$ $V_1 = 2 \text{ V}$	$D_1 = (2^8 - 1) \cdot 20\%$ $D_1 = 255 \times 0,2$ $D_1 = 51$
Y = 80 %	$P_2 = 0,8 \times 10^9$ $P_2 = 87,2 \text{ kW}$	$V_1 = 0,8 \times 10$ $V_1 = 8 \text{ V}$	$D_2 = 255 \times 0,8$ $D_2 = 204$

3.2- Citer les autres signaux analogiques utilisés par le convertisseur :

Sortie tension : 0-5 V ou 0-10 V

Sortie courant : 0-20 mA

Indiquer les avantages de la solution 4-20 mA :

Longueur de ligne plus grande (moins de pertes et moins de parasites)

Détection facile de la coupure de ligne (pas de valeur 0 mA).

4-Etude de la régulation de température

4-1 Déterminer la fonction de transfert isomorphe

Si $M(p)$ et $Y_R(p)$ sont les transformées de Laplace de $m(t)$ et $y_R(t)$, la transformée de l'équation différentielle s'écrit :

$$400 p \times M(p) + M(p) = 2 \cdot Y_R(p)$$

$$H(p) = \frac{M(p)}{Y_R(p)} = \frac{2}{1+400P}$$

Document Corrigé III.3

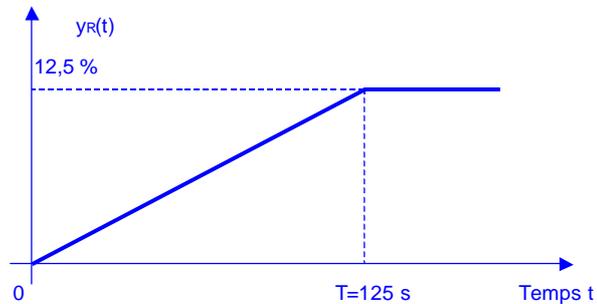
4.2 Transformée de Laplace Y_R

Démonstration et justification :

Si on raisonne sur une variation $y_R(t)$ de $Y_R(t)$ à partir de Y_{R0} , on peut écrire :

$$Y_R(t) = Y_{R0} + y_R(t)$$

La variation $y_R(t)$ est donnée par le chronogramme suivant :



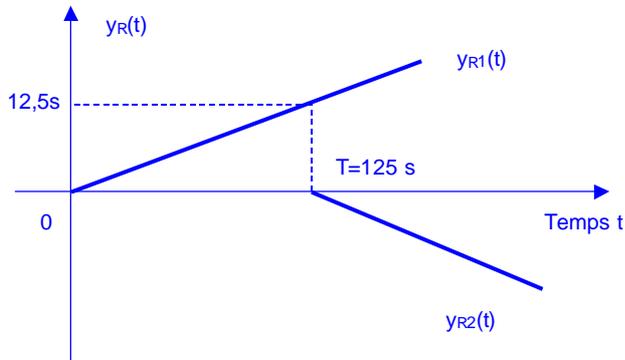
Rechercher l'évolution du signal $M(t)$ revient en fait à déterminer l'évolution d'une variation $m(t)$ de $M(t)$ à partir de M_0 telle que :

$$M(t) = M_0 + m(t)$$

$m(t)$ et $y_R(t)$ sont liés par l'équation : $400 \, \text{dm}(t) / \text{dt} + m(t) = 2y_R(t)$

Transformée de Laplace de $y_R(t)$.

Cette fonction en rampe limitée ne fait pas partie de la bibliothèque standard mais on peut l'assimiler à la superposition des deux signaux $y_{R1}(t)$ et $y_{R2}(t)$.



$$y_{R1}(t) = at.u(t) \quad \text{avec } a = 12,5\% / 125 = 0,1 \, \% \, \text{s}^{-1}$$

$$y_{R2}(t) = -a(t - T).u(t - T) \quad \text{avec } T = 125 \, \text{s}$$

Puisque : $y_R(t) = y_{R1}(t) + y_{R2}(t)$

on obtient :

$$Y_R(p) = Y_{R1}(p) + Y_{R2}(p)$$

Donc :

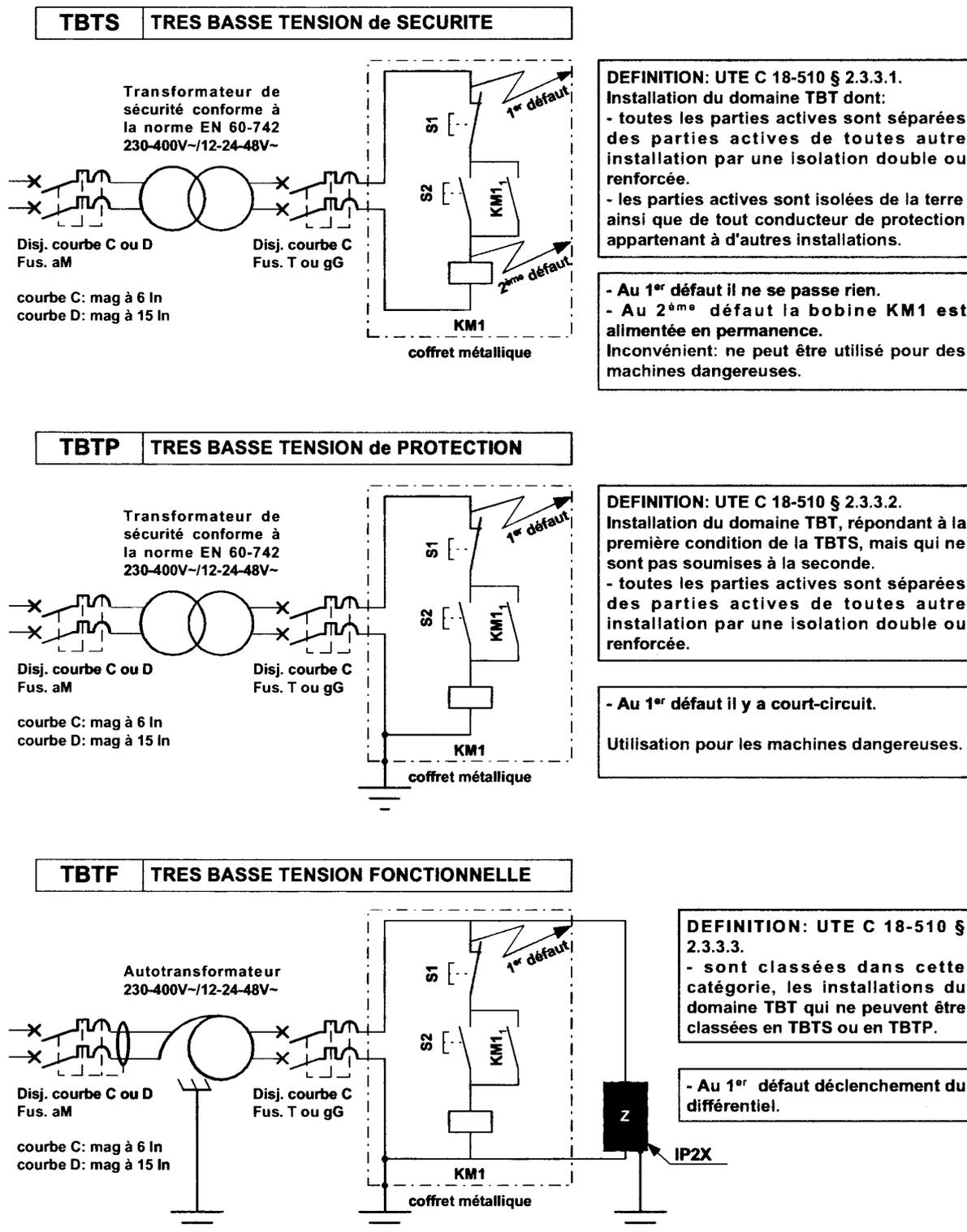
$$Y_R(p) = a/p^2 - (a/p^2) \cdot e^{-Tp}$$

$$Y_R(p) = \frac{a}{P^2} (1 - e^{-Tp})$$

PARTIE IV

IV.1) - Remplacement du transformateur T2 et de sa protection

V.1.1) T.B.T.S., T.B.T.P. et T.B.T.F. ?



IV.1.2) Choix du transformateur et de sa protection

Le transformateur T2 alimente le circuit de commande qui comprend :

- le contacteur KM1 alimentant le circuit chauffage 109 kW,
- le contacteur KM2 alimentant le circuit chauffage 59,5 kW,
- le contacteur KM4 alimentant le moteur M1 3 kW,
- 2 contacteurs KM5 et KM11 alimentant le moteur M1 5,7 kW,
- le contacteur KM6 alimentant le moteur M2 0,37 kW,
- 8 contacteurs auxiliaires KA1 à KA8,
- 3 voyants de signalisation.

Matériel choisi :

- Les contacteurs

DESIGNATION	REFERENCES CONTACTEURS	REFERENCES BOBINES	Pap (VA)	Pm (VA)
KM1 (109 kW)	LC1-F265M5	LX1-FH048	1 200	95
KM2 (59,5 kW)	LC1-F150M5	LX1-FF048	550	45
KM4 (3 kW)	LC1-D0910E5	LX1-D2E5	60	7
KM5 & KM11	LC1-D1810E5	LX1- D2E5	60	7
KM6 (0,37 kW)	LC1- D0910E5	LX1- D2E5	60	7
KA1 à KA8	CA2 EN			4

- Les voyants :

3 voyants de puissance maxi. 3 W.

Calcul de la puissance d'appel du transformateur :

$$P_{appel} = 0,8(P_{m1} + P_{m2} + \dots + P_{v1} + P_{v2} + \dots + P_a)$$

$$P_{appel} = 0,8[(95 + 45 + 7 \times 4 + 4 \times 8) + (3 \times 3) + 1\ 200]$$

$$P_{appel} = 1\ 409\ VA$$

On détermine à partir du doc. ressource IV.1 **la puissance du transformateur : P = 250 VA**

Contôle : $P_{cont} = 70\% (P_{m1} + P_{m2} + \dots + P_{v1} + P_{v2} + \dots) = 70\% (200 + 9) = 146,3\ VA$

Le transformateur choisi est de puissance suffisante :

TRANSFO. 250 VA, référence : 42733, tensions : 400 V / 48 V

Protection :

- au primaire (400 V) protection contre les courts-circuits et courant d'appel important à la mise sous tension :
fusible aM calibre 1 A ou disjoncteur type C calibre 3 A.
- au secondaire (48 V) protection contre les surcharges et les courts-circuits :
fusible gG calibre 6 A ou disjoncteur type C calibre 6 A.

IV.2.1) - Moteur M1 à deux vitesses :

Alimenté par des tensions de fréquence f , le moteur asynchrone triphasé ayant $2p$ pôles tourne normalement à une vitesse : $N' = f \cdot (1-g) / p$, peu inférieure à la vitesse synchrone f / p .

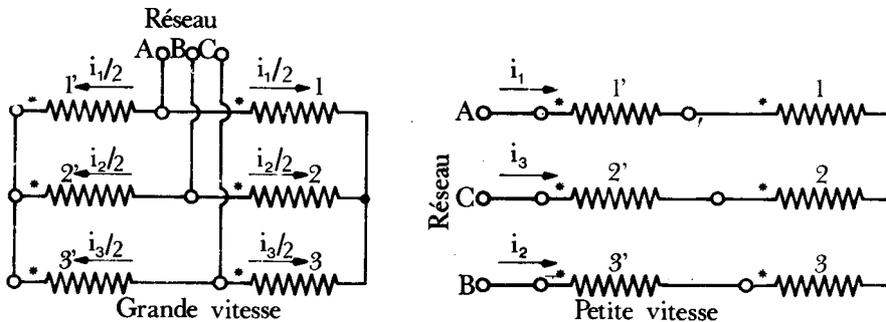
Pour changer la vitesse, à f donnée, on doit **modifier le nombre de pôles**. Cette modification du nombre de pôles $2p$ d'un enroulement s'obtient **en changeant les connexions de ses bobines**.

De ce fait on obtient **la division ou la multiplication par deux des pôles (2p)**.

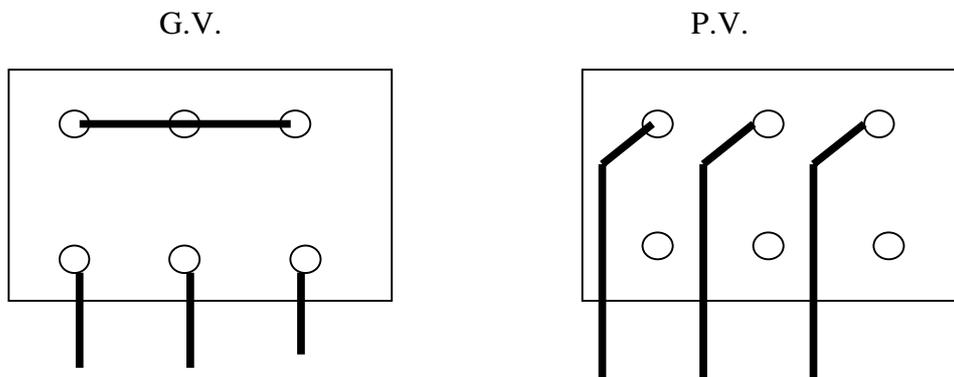
Ce moteur à 2 vitesses ayant un rapport de vitesse $1/2$, à un seul bobinage avec pôles commutables est appelé : **système Dahlander**.

Moteur M1 : GV 4 pôles (1 440 tr/min) $P = 5,7$ kW
 PV 8 pôles (680 tr/min) $P = 3$ kW

Schéma de principe :



Branchement sur la plaque à bornes du moteur :



IV.2.2) - Choix du groupe moto-ventilateur et du variateur :

a) Choix du ventilateur :

Données : Débit maxi : $4,16 \text{ m}^3/\text{s} = 250 \text{ m}^3/\text{min}$
 $P = 930 \text{ Pa}$

Calcul de h : $h = P / (r.g) = 930 / (1\,000 \times 9,81) = 0,0949 \text{ m}$

En utilisant le doc. ressource IV.9, pour un débit de $250 \text{ m}^3/\text{min}$ et une hauteur de 95 mm, on obtient un ventilateur de type **EM 623 D**, à associer à un moteur de puissance 5,5 kW.

b) Choix du moteur :

Pour $U = 400 \text{ V}$, 4 pôles ($N_s = 1\,500 \text{ tr.}\cdot\text{min}^{-1}$) et $P = 5,5 \text{ kW}$

Réf. Du moteur : LS 132 S

Calcul de M_n , M_m et P_a :

$M_n = P/\Omega = P \times 60 / (N \times 2 \times \pi) = 5\,500 \times 60 / (1\,430 \times 2 \times \pi) = \underline{\underline{36,7 \text{ Nm}}}$

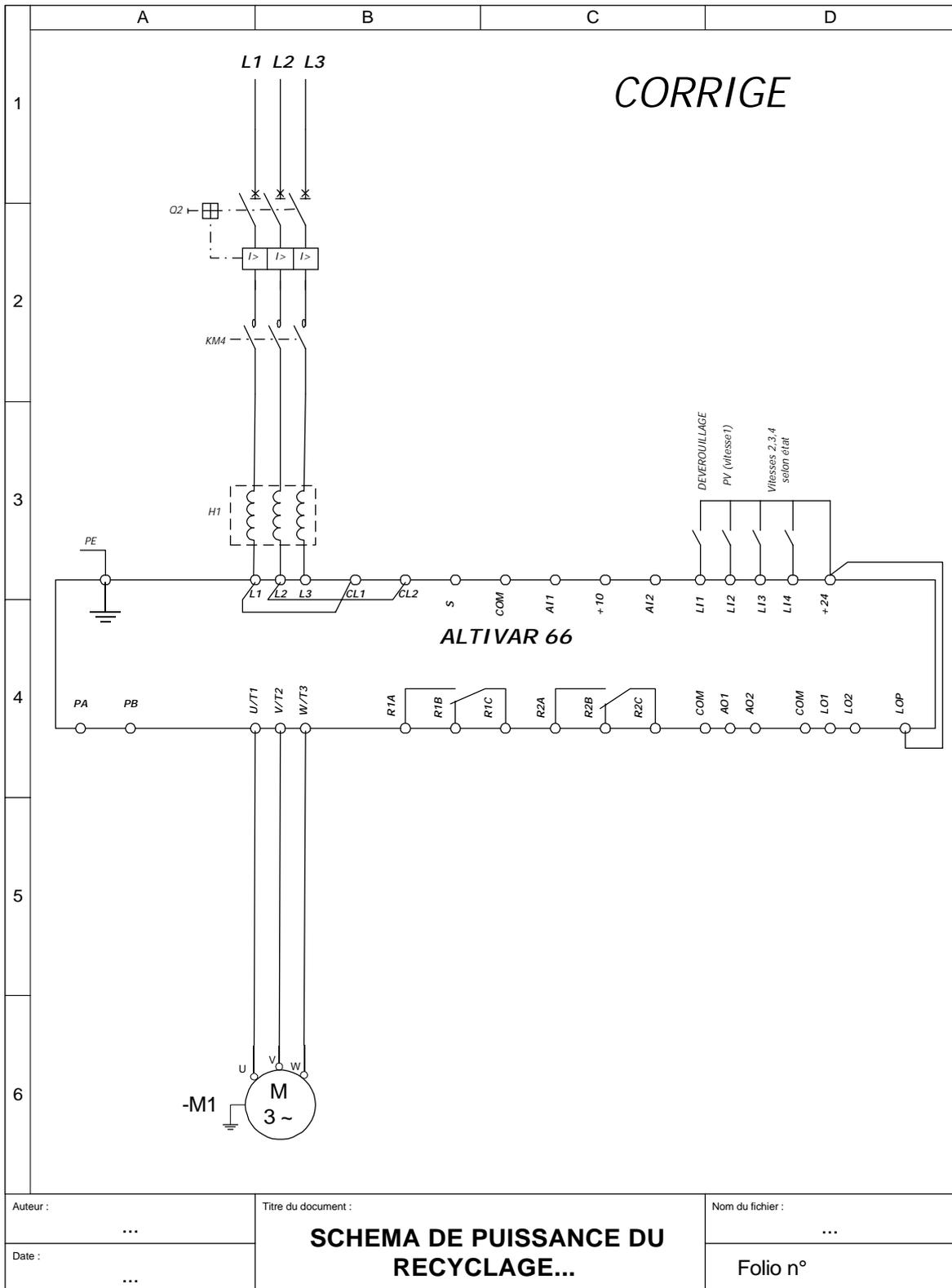
$M_m = 2,5 \times M_n = 2,5 \times 36,7 = \underline{\underline{91,8 \text{ Nm}}}$

$P_a = 3 \times U \times I \times \cos \varphi = 3 \times 400 \times 11,9 \times 0,82 = \underline{\underline{6\,760 \text{ W}}}$

c) **Choix du variateur** : application couple variable (proportionnel au carré de la vitesse – ventilateur.)

Réf. : **ATV 66 – U72 N4**
 $P = 5,5 \text{ kW}$ alim. Tri. 400 V

IV.2.3) - Schéma de raccordement réseau-variateur-moteur



Auteur :
...
Date :
...

Titre du document :
**SCHEMA DE PUISSANCE DU
RECYCLAGE...**

Nom du fichier :
...
Folio n°