23.1.4. Données électriques des logiciels

23.1.4.1. Solution avec moteurs à courant continu

Rappels

Considérons le schéma équivalent représenté par la figure A23 1-4 ci-dessous

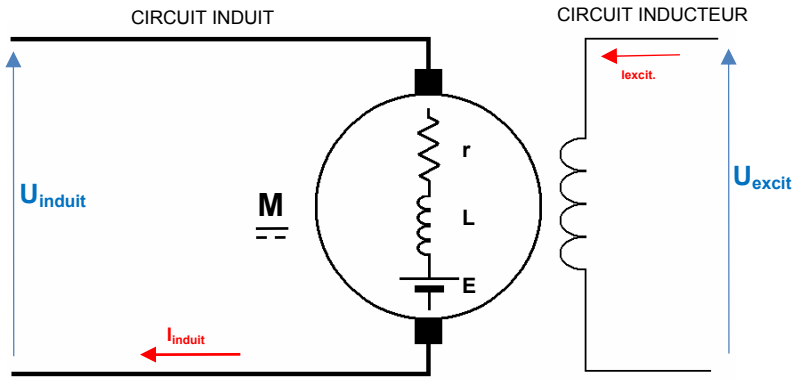

Fig. A23.1-4

Alimenté en courant continu ou redressé sous une tension U, le moteur réagit en opposant une force contre-électromotrice E telle que:

$$U = E + r \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt}$$

- $r \cdot i$ ⇨ représente la chute ohmique interne de l'induit.
- $L \cdot \frac{di}{dt}$ ⇨ représente l'ondulation de la tension aux bornes de la machine due à l'allure de la tension redressée appliquée.
- $\frac{L}{r}$ ⇨ définit la constante de temps de l'induit et s'exprime en millisecondes **(ms)**.

La force contre-électromotrice E est liée à la vitesse de rotation de l'induit et à l'excitation (flux inducteur) par la relation suivante:

$$E = k \cdot \omega \cdot \Phi$$

- k ⇨ représente la constante propre du moteur.
- ω ⇨ la vitesse de rotation du moteur s'exprime en **rd/s.**
- Φ ⇨ le flux fournit par l'inducteur de la machine.

De cette relation on en déduit les remarques fondamentales suivantes :

- à excitation constante, la force contre-électromotrice (F.C.E.M.) est proportionnelle à la vitesse ω,
- à fonctionnement à puissance constante (**P = E.I = Cst**), la F.C.E.M. est maintenue constante par le biais d'un dispositif de régulation agissant sur le niveau du courant d'excitation. Dans ce cas, la variation de flux $\Delta\phi$ est inversement proportionnelle à la variation de vitesse $\Delta\omega$.

Le couple développé par le moteur à courant continu est lié au courant induit et au flux inducteur par la relation :

$$C = k' \cdot \Phi \cdot I$$

- k' ⟹ représente la constante propre du moteur.
- Φ ⟹ le flux fournit par l'inducteur de la machine.
- I ⟹ le courant induit exprimée en ampères.

De cette relation on en déduit les remarques fondamentales suivantes :

- à excitation constante, le couple développé par le moteur est proportionnel au courant parcourant l'induit
- à fonctionnement à puissance constante, la variation de couple **ΔC** est proportionnelle à la variation de flux **Δϕ**.

Remarque:

La puissance électrique transmise au rotor est donnée par la relation :

$$P_{élect} = E \cdot I = k \cdot \omega \cdot \Phi \cdot I$$

Or nous avons vu précédemment que la puissance mécanique était égale à la relation :

$$P_{méca} = C \cdot \omega = k' \cdot \omega \cdot \Phi \cdot I$$

Dans une machine idéale sans perte nous pouvons considérer l'égalité suivante :

$$P_{élect} = P_{méca} \quad \text{soit} \quad k = k'$$

Forme du courant

Lorsque le moteur est alimenté à travers un variateur de vitesse à thyristors, le courant traversant l'induit est un courant pulsé.

Ce courant est caractérisé par trois valeurs:

- **I_{moy}** ⟹ **une valeur moyenne**. C'est le courant moyen qui génère le couple sur l'arbre du moteur.
- **I_{eff}** ⟹ **une valeur efficace**. C'est le courant efficace qui provoque l'échauffement de tout le circuit concerné (contacteur et disjoncteur de ligne, variateur, moteur, câbles de raccordement,...).
- **I_c** ⟹ **une valeur de crête**. Le courant de crête affecte la commutation du moteur. En général, pour les applications de levage le courant crête est de l'ordre de deux fois le courant nominal (**I_{moy}**) du moteur dans un domaine de fonctionnement ne dépassant pas la vitesse nominale. Pour les applications nécessitant un fonctionnement au-delà de la vitesse nominale, cette valeur est alors réduite. Les catalogues des constructeurs des machines à courant continu donnent les coefficients de déclassement à appliquer dans ce mode de fonctionnement.

Notion de facteur de forme:

Le facteur de forme du courant moteur s'exprime par la relation :

$$\mathbf{F = I_{eff} / I_{moy}}$$

Cette valeur dépend de plusieurs paramètres :

- suivant la structure du convertisseur de puissance (mono ou triphasé, pont mixte ou complet, ...),

- la valeur de la constante de temps du circuit de charge (L/R en ms),
- le niveau de tension délivré par le convertisseur de puissance courant.

Dans le cas d'un pont de graëtz triphasé à thyristors pilotant l'induit d'un moteur à courant continu nous retiendrons une valeur voisine de 1,10.

Montages de base

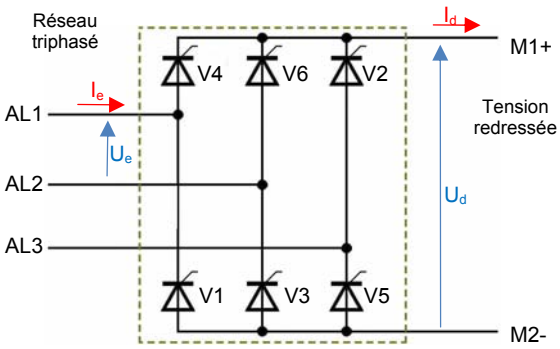

Fig. A23.1-5a

Pont de Graëtz triphasé

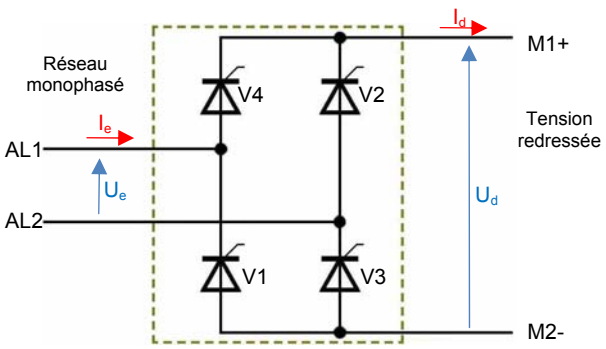

Fig. A23.1-5b

Pont de Graëtz monophasé

Le tableau ci-dessous récapitule les principales caractéristiques de ces convertisseurs.

	Pont de Graëtz triphasé		**Pont de Graëtz monophasé**	
	Pont complet	*Pont mixte*	*Pont complet*	*Pont mixte*
Tension redressée	$U_d = \frac{3\cdot\sqrt{2}}{\pi}\cdot U_e \cdot \cos\alpha$	$U_d = \frac{3\cdot\sqrt{2}}{\pi}\cdot U_e \cdot \frac{1+\cos\alpha}{2}$	$U_d = \frac{2\cdot\sqrt{2}}{\pi}\cdot U_e \cdot \cos\alpha$	$U_d = \frac{2\cdot\sqrt{2}}{\pi}\cdot U_e \cdot \frac{1+\cos\alpha}{2}$
Tension inverse semi-conducteurs	$U_i = \sqrt{2}\cdot U_e$	$U_i = \sqrt{2}\cdot U_e$	$U_i = \sqrt{2}\cdot U_e$	$U_i = \sqrt{2}\cdot U_e$
Courant ligne	$I_e = \sqrt{\frac{2}{3}}\cdot I_d = 0{,}816\cdot I_d$	$I_e = \sqrt{\frac{2}{3}}\cdot I_d = 0{,}816\cdot I_d$	$I_e = I_d$	$I_e = I_d$

avec :

- **Ue** la tension efficace du réseau entre phases (tension composée),
- **Ie** le courant d'entrée du pont redresseur par phase,
- **Id** le courant de sortie du pont redresseur en supposant que le circuit de charge est très selfique (courant peu ondulé),
- **cosα** grandeur dépendant de l'angle de retard α à l'amorçage des thyristors.

Généralités sur le calcul du facteur de puissance d'un réseau d'alimentation (cosinus φ)

Tout système électrique utilisant le courant alternatif, met en œuvre 2 formes d'énergie :

- l'énergie active
- l'énergie réactive

Dans les engins de levage, seule la partie active de l'énergie électrique consommée est transformée par les machines en énergie mécanique.

L'énergie réactive quant à elle, est utilisée en particulier pour le fluxage des moteurs d'entraînement (moteurs CC et AC) ainsi que pour celui des transformateurs d'alimentation.

Pour chacune de ces énergies correspond :

- un **courant actif (Ia)** en phase avec la tension simple du réseau d'alimentation,
- un **courant réactif (Ir)** déphasé de 90° en arrière par rapport au courant actif dans le cas d'une charge inductive (moteur). Le courant réactif est également appelé courant magnétisant.

Les deux courants actif et réactif se combinent ainsi vectoriellement pour former le **courant apparent**. **(It)** Celui-ci est déphasé d'un angle φ par rapport au courant actif. Le courant apparent est cependant bien réel, puisque c'est celui qui parcourt les conducteurs depuis la source jusqu'aux différents récepteurs. C'est la valeur efficace de l'intensité de ce courant qui permet donc de dimensionner thermiquement les éléments constitutifs des circuits de puissance. Nous retrouverons ces notions importantes lorsque nous aborderons le calcul des moteurs asynchrones et le dimensionnement des convertisseurs de fréquence associés.
Si l'on suppose que le réseau d'alimentation ne véhicule qu'un courant filtré des harmoniques générées par les dispositifs de variation de vitesse, les règles de composition vectorielle des intensités conduisent à la relation suivante :

$$I_a = I_t \cdot \cos\varphi$$

Le cosinus φ est dans ce cas appelé facteur de puissance (Fp), car il peut également s'exprimer par la relation suivante :

$$F_p = \frac{P}{S}$$

avec **P** la puissance active en watts (W)

S la puissance apparente en voltampères (VA)

Le logiciel de calcul moteur permet de calculer dans le cas d'une motorisation par des machines à courant continu à excitation séparée, pilotées par des variateurs de vitesse à **thyristors triphasés de type pont de graëtz**, le facteur de puissance moyen sur cycle et si besoin la valeur des batteries de compensation d'énergie réactive à prévoir dans le cas où un facteur de puissance minimum est imposé par l'exploitant de l'engin. Il est à noter par ailleurs que pour les motorisations avec des machines asynchrones pilotées par des convertisseurs de fréquence, le facteur de puissance est voisin de 1 car l'étage de tête de ces variateurs est généralement constitué par un pont de diodes. Dans ce cas il n'y a pas de déphasage entre la tension simple et le courant circulant dans chaque phase du réseau d'alimentation.

Calcul du facteur de puissance d'une installation en fonction de l'angle de retard à l'allumage des thyristors

Hypothèses de calcul

Pour la détermination du facteur de puissance du montage, nous avons effectué les hypothèses suivantes :

- tension nominale du réseau d'alimentation (valeur efficace) — Uo
- force électromotrice nominale du moteur (voir catalogue RECTIVAR) — E = 1,05 Ue
- chute de tension rI due à la résistance du circuit de l'induit — $\Delta u = 0{,}06\ E$
- coefficient à appliquer au cosinus α pour obtenir le facteur de puissance (voir rappel sur les convertisseurs de puissance) — $k_\alpha = 3/\pi$
- le courant est supposé être en régime de conduction continu

Cas du fonctionnement en moteur à la vitesse nominale en moteur

- tension moyenne aux bornes de l'induit : U = 1,05.Ue + 0,06.1,05.Ue U = 1,113.Ue
- tension crête du réseau Uc = √2.Ue Uc = 1,414.Ue
- sinus β_0 : β_0 = U/Uc = 1,113.Ue/1,414.Ue = 0,787 soit β_0 = 51,9°
- valeur de l'angle α_0 : α_0 = 120 - (β_0 + 30) = 90 - β_0 = 90 - 51,9 soit α_0 = 38,1°
- d'où cos α_0 = 0,787

On en déduit finalement la valeur du facteur de puissance pour ce régime de fonctionnement :

$Fp_0 = 3/\pi.\cos \alpha_0 = 0,955.0,787$ soit $Fp_0 = 0,75$

Cas du fonctionnement en moteur à mi-vitesse nominale

- tension moyenne aux bornes de l'induit : U = 1,05.Ue/2 + 0,06.1,05.Ue U = 0,588.Ue
- tension crête du réseau Uc = √2 Ue Uc = 1,414.Ue
- sinus β_1 : β_1 = U/Uc = 0,588.Ue/1,414.Ue = 0,416 soit β_1 = 24,6°
- valeur de l'angle α_1 : α_1 = 120 - (β_1 + 30) = 90 - β_1 = 90 - 24,6 soit α_1 = 65,4°
- d'où cos α_1 = 0,416

On en déduit la valeur du facteur de puissance pour ce régime de fonctionnement :

$Fp_1 = 3/\pi.\cos \alpha_1 = 0,955.0,416$ soit $Fp_1 = 0,39$

C'est cette valeur qui sera retenue dans le tableur comme valeur moyenne du facteur de puissance au cours des phases transitoires de mise en vitesse ou de ralentissement en régime moteur.

Cas du fonctionnement à vitesse nulle ou en PV

- tension moyenne aux bornes de l'induit : U = 0,06.1,05.Ue U = 0,063.Ue
- tension crête du réseau Uc = √2.Ue Uc = 1,414.Ue
- sinus β_2 : β_2 = U/Uc = 0,063.Ue/1,414.Ue = 0,045 soit β_2 = 2,55°
- valeur de l'angle α_2 : α_2 = 120 - (β_2 + 30) = 90 - β_2 = 90 - 2,55 soit α_2 = 87,4°
- d'où cos α_2 = 0,044

On en déduit la valeur du facteur de puissance pour ce régime de fonctionnement :

$Fp_2 = 3/\pi.\cos \alpha_2 = 0,955.0,044$ soit $Fp_2 = 0,04$

Cas du fonctionnement à mi-vitesse nominale en générateur

- tension moyenne aux bornes de l'induit : U = - 1,05.Ue/2 + 0,06.1,05.Ue U = - 0,462.Ue
- tension crête du réseau Uc = √2.Ue Uc = 1,414.Ue
- sinus β_3 : β_3 = U/Uc = - 0,462.Ue/1,414.Ue = - 0,327 soit β_3 = - 19,07°
- valeur de l'angle α_3 : α_3 = 120 - (β_3 + 30) = 90 - β_3 = 90 + 19,07 soit α_3 = 109,07°
- d'où cos α_3 = - 0,327

On en déduit la valeur du facteur de puissance pour ce nouveau régime de fonctionnement :

$Fp_3 = 3/\pi.\cos \alpha_3 = 0,955.(- 0,327)$ soit $Fp_3 = - 0,31$

C'est cette valeur qui sera retenue dans le tableur comme valeur moyenne du facteur de puissance au cours des phases transitoires de mise en vitesse ou de ralentissement en régime générateur.

Cas du fonctionnement à vitesse nominale en générateur

- tension moyenne aux bornes de l'induit : U = - 1,05.Ue + 0,06.1,05.Ue U = - 0,987.Ue
- tension crête du réseau Uc = $\sqrt{2}$.Ue Uc = 1,414.Ue
- sinus β_4 : β_4 = U/Uc = - 0,987.Ue/1,414.Ue = - 0,698 soit β_4 = - 44,26°
- valeur de l'angle α_4 : α_4 = 120 - (β_4 + 30) = 90 - β_4 = 90 + 44,26 soit α_4 = 134,26°
- d'où cos α_4 = - 0,698

On obtient alors la valeur du facteur de puissance pour ce dernier régime de fonctionnement :

$Fp_4 = 3/\pi.\cos \alpha_4 = 0{,}955.(- 0{,}698 =$ soit Fp_4 = - 0,67

Calcul de la puissance apparente ligne

Pour chacune des étapes élémentaires du cycle de fonctionnement, nous calculerons à l'aide du logiciel la puissance apparente vue du réseau au moyen de la relation suivante :

$$s = U_e \cdot i_e \cdot \sqrt{3}$$

avec
- s puissance apparente élémentaire en V A
- U_e tension réseau entre phases en volts
- i_e intensité efficace du courant ligne élémentaire en ampères

Dans le cas d'un pont de graëtz triphasé, il est possible d'exprimer le courant ligne en fonction du courant continu traversant l'induit du moteur de la façon suivante :

$$i_e = 1{,}10 \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_e \cdot i_d \cdot Nbre$$

avec
- 1,10 coefficient lié au facteur de forme
- I_d intensité moyenne du courant induit en ampères
- Nbre nombre de moteurs en parallèle

D'où l'expression retenue finalement dans le tableur :

$$s = 1{,}10 \cdot \sqrt{2} \cdot U_e \cdot i_d \cdot Nbre$$

Calcul de la puissance active ligne

La connaissance du facteur de puissance et de la puissance apparente absorbée vus par le réseau d'alimentation permet d'en déduire aisément la puissance active élémentaire pour chacune des étapes du cycle de fonctionnement :

$$p = s \cdot Fp$$

avec
- p puissance active élémentaire en watts (W)
- s puissance apparente élémentaire en voltampères (VA)
- Fp facteur de puissance élémentaire pour chacune des étapes du cycle

Calcul de la puissance réactive ligne

De la même façon, la connaissance du facteur de puissance et de la puissance apparente absorbée vus par le réseau d'alimentation permet d'en déduire aisément la puissance réactive élémentaire pour chacune des étapes du cycle de fonctionnement:

$$q = s \cdot \sin[\arccos(Fp)]$$

avec
- q : puissance réactive élémentaire en volts ampères réactifs (Var)
- s : puissance apparente élémentaire en voltampères (VA)
- Fp : facteur de puissance élémentaire (cosinus du mouvement) pour chacune des étapes du cycle

Calcul du facteur de puissance sans batterie de relèvement

Nous appliquerons la méthode de la somme des p carrés t afin d'obtenir les puissances équivalentes sur un cycle de durée T.

Par convention, nous appellerons :

- la puissance totale active sur cycle $P = \sqrt{\sum p^2 \cdot t/T}$
- la puissance totale réactive sur cycle $Q = \sqrt{\sum q^2 \cdot t/T}$
- la puissance totale apparente sur cycle $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

En l'absence de dispositif de relèvement du cosinus réseau, le facteur de puissance ou cosinus φ résultant sera :

$$\cos \varphi = P/S$$

soit encore

$$\varphi = \arccos(P/S)$$

Calcul du facteur de puissance avec batterie de relèvement

Dans ce cas le facteur de puissance du réseau cos φ' est imposé par l'exploitant.

Par convention, nous appellerons :

- la puissance active sur cycle $P' = P$
- la puissance réactive sur cycle $Q' < Q$
- la puissance apparente sur cycle $S' < S$
- le facteur de puissance du réseau $\cos \varphi' = P'/S' > \cos \varphi$

Des relations précédentes on obtient avec $S' = P / \cos \varphi'$:

$$Q'^2 = S'^2 - P'^2 = (P/\cos \varphi')^2 - P^2$$

soit

$$Q'^2 = P^2 \operatorname{tg}^2 \varphi'$$

finalement

$$Q' = P \cdot \operatorname{tg} \varphi'$$

A l'aide de cette dernière expression on peut alors déterminer la valeur de la batterie de relèvement du cosinus réseau :

$$Qbat = Q - P \cdot \operatorname{tg} \varphi'$$

23.1.4.2. Tableau récapitulatif des résultats de calculs des modèles pour moteurs CC

Entrée des données complémentaires pour les moteurs CC

Ces données concernent essentiellement les caractéristiques du (ou des) moteur(s) du mouvement, ainsi que celles du réseau d'alimentation de l'équipement. Elles sont à renseigner dans les cellules grisées des zones "CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES" et "SOLUTION MOTEUR A COURANT CONTINU" des différents logiciels de calcul selon le modèle ci-après :

CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES

Tension réseau (V)	**Ue**	Facteur de puissance réseau	**Fp**
Fréquence réseau (Hz)	**F**		

SOLUTION MOTEUR A COURANT CONTINU

Rendement moteur (%)	η_{mot}	Tension induit (V)	**Ud**
Coef. Courant (> ou = 1)	$\mathbf{Ki}_{mot}$	Coef. sur le couple Cd/Cn	**Z**

Tableau 5

avec :

- **Ue** ⇨ tension nominale du réseau d'alimentation des variateurs de vitesse en volts **(V)**
- **F** ⇨ fréquence du réseau d'alimentation
- **Fp** ⇨ facteur de puissance du réseau d'alimentation (valeur mini. fréquemment imposée par le client final)
- η_{mot} ⇨ rendement du moteur (pertes magnétiques et par effet joule)
- **Ud** ⇨ tension nominale de l'induit du moteur en volts **(V)**
- $\mathbf{Ki}_{mot}$ facteur de correction de l'intensité du courant induit. Il permet de prendre en compte le fait que certains moteurs ne sont pas compensés et qu'il s'en suit une non proportionnalité entre le couple disponible sur l'arbre et le courant absorbé. Ce coefficient $\mathbf{Ki}_{mot}$ est ≥ 1. Dans le cas fréquent de l'utilisation d'un moteur compensé, nous avons $\mathbf{Ki}_{mot} = 1$

Remarque :

La cellule Z relative au ratio de couple Cd/Cn et le nombre de moteurs ont déjà étaient présentées précédemment au cours de la détermination de la Puissance nominale mécanique du moteur.

Tableau des résultats de calcul

A partir de ces données complémentaires et des résultats des calculs mécaniques vus précédemment, le tableur effectue pour chaque phase élémentaire les opérations dont les résultats sont rangés respectivement dans les colonnes nommées de **a** à **k** et dans les cases de **l** à **u** du tableau ci-après:

		h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
	PHASES CYCLE	P élect en W	I induit en A	I carré t mot.CC	P carré t freinage	COSINUS	P appar ligne en VA	P active ligne en W	P réacti. ligne en Var	P appar carré t ligne	P active carré t ligne	P réact. carré t ligne
0	ARRET	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
1	ACC. MONT. CHARGE	301 224	717	8,74E+05	0,00E+00	0,39	446 281	174 733	410 652	3,39E+11	5,19E+10	2,87E+11
	VIT. STAB. MONTEE	253 036	602	5,06E+06	0,00E+00	0,75	374 887	282 819	246 076	1,96E+12	1,12E+12	8,45E+11
	RALENTIS. MONTEE	208 578	497	4,19E+05	0,00E+00	0,39	309 020	120 991	283 349	1,62E+11	2,49E+10	1,37E+11
2	ARRET	0	0	0,00E+00	0,00E+000	0	0	0	0	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
3	ACC. DESC. CHARGE	-110 331	-263	1,17E+05	8,15E+09	-0,31	163 462	-49 951	155 642	4,54E+10	4,24E+09	4,12E+10
	VIT.STAB.DESCENTE	-151 118	-360	1,81E+06	3,76E+11	-0,67	223 890	-149 663	166 516	6,99E+11	3,13E+11	3,78E+11
	RALENTIS. DESCENTE	-188 747	-449	3,43E+05	2,39E+10	-0,31	279 640	-85 454	266 263	5,23E+09	8,01E+08	4,430E+09
4	ARRET	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
5	ACC. MONTEE VIDE	243 743	580	1,15E+06	0,00E+00	0,39	361 120	141 389	332 290	2,57E+09	3,95E+08	2,18E+09
	VIT. STAB. MONTEE	132 019	314	3,48E+05	0,00E+00	0,75	195 593	147 558	128 388	4,81E+10	2,15E+10	2,66E+10
	RALENTIS. MONTEE	26 463	63	1,35E+04	0,00E+00	0,39	39 206	15 350	36 076	2,11E+11	1,97E+10	1,91E+11
N	Dernière phase N	X watts	X amp	x,xxE+xx	x,xxE+xx	X	X VA	X watts	X Var	x,xxE+xx	x,xxE+xx	x,xxE+xx
				s	4,72E+11	TOTAL P carré t Résist. Frein				4,72E+11	4,72E+11	4,72E+11

		w	x	y
1,08E+07	TOTAL I carré t moteur CC	216 412	138 301	166 454
t		**z**	**aa**	**ab**
348	Intensité efficace en A par moteur	cos réseau sans batterie de relèv.		0,64
u				**ac**
146	Puissance du variateur en kW	Bat. de relèv. de cos φ en kVar.		112
v				**ad**

Tableau 6

A partir des données saisies dans le tableau4 (description du cycle de fonctionnement), le tableur effectue également pour chacune des phases élémentaires du mouvement les opérations de report et de calcul figurant dans les colonnes de h à z et détaillées ci-après :

Colonne **h** ⇨ calcul de la puissance électrique absorbée $p_{élec} = p_{méca} / \eta$ **(W)**
ou $= p_{méca} . \eta$ **(W)**

La puissance électrique absorbée ou renvoyée au réseau est équivalente à la puissance mécanique transmise à l'arbre du moteur divisée ou multipliée par le rendement électrique de celui-ci.
Cette valeur signée, correspond à la somme des puissances dans le cas de multi-moteurs pour un même mouvement.

Colonne **i** ⇨ calcul du courant induit par moteur $i_{ind} = p_{élec} . Ki_{mot} / U_{ind} / N_{bre\ mot.}$ **(A)**

Le courant induit est obtenu à partir de la puissance électrique absorbée ou fournie, divisée par la tension induit maximale de la phase concernée et par le nombre de moteurs du mouvement le tout affecté du coefficient multiplicateur Ki_{mot} dépendant des caractéristiques intrinsèques des moteurs.

Colonne **j** ⇨ calcul des courants d'induit carré t élémentaires $i_{ind}^2 t_i$

avec i_{ind} courant induit élémentaire (colonne **i**)
t_i durée d'une étape élémentaire du cycle

Colonne **k** ⇨ calcul de la puissance mécanique carré t de freinage $p_{mFr}^2 t_i$

Si au cours de la phase élémentaire considérée la puissance mécanique est négative, il y a alors le report automatique dans la case correspondante de la colonne de la valeur $p_{mi}^2 . t_i$ calculée précédemment (paragraphe 23 1 3 5)

Colonne **l** ⇨ report automatique des valeurs du facteur de puissance ou **cosinus** φ du montage

Ces valeurs dépendent pour chacune des phases élémentaires du régime de fonctionnement du moteur (voir le chapitre facteur de puissance).

Colonne **m** ⇨ calcul de la puissance électrique apparente ligne $p_{app} = \sqrt{3} . U_{réseau} . I_{réseau}$ **(VA)**

soit encore $p_{app} = 1{,}10 . \sqrt{3} . U_{réseau} . i_{ind} . \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} . N_{bre\ mot.}$

avec
- i_{ind} courant induit élémentaire par moteur (colonne **i**)
- $U_{réseau}$ tension d'alimentation entre phases du variateur de vitesse (case U_e)
- **1,10** coefficient représentant le facteur de forme du convertisseur de puissance
- **√2/√3** ratio liant le courant redressé du pont de graëtz au courant d'entrée par phase

Colonne **n** ⇨ calcul de la puissance électrique active ligne $P_{active} = P_{app} .$ **cosinus** φ **(W)**

Le tableur effectue ligne à ligne le produit de la puissance apparente (colonne **m**) avec le facteur de puissance du réseau (colonne **l**).

Colonne **o** ⇨ calcul de la puissance électrique réactive ligne $P_{réactive} = P_{app} .$ **sinus** φ **(Var)**

Le tableur effectue ligne à ligne le produit de la puissance apparente (colonne **m**) avec le sinus de l'angle de déphasage du courant ligne sur la tension en utilisant la relation mathématique:

$P_{réactive} = P_{app} .$ **sinus (arc cosinus** φ**)**

Colonne **p** ⇨ calcul des puissances apparentes ligne carré t élémentaires $p_{app}^2 t_i$

avec
- p_{app} puissance apparente élémentaire (colonne **m**)
- t_i durée d'une étape élémentaire du cycle

Colonne **q** ⇨ calcul des puissances active ligne carré t élémentaires $p_{active}^2 t_i$

avec
- p_{active} puissance active élémentaire (colonne **n**)
- t_i durée d'une étape élémentaire du cycle

Colonne **r** ⇨ calcul des puissances réactives ligne carré t élémentaires $p_{réact}^2 t_i$

avec
- $p_{réact}$ puissance réactive élémentaire (colonne **o**)
- t_i durée d'une étape élémentaire du cycle

A partir des données rangées dans les colonnes **h** à **r**, le tableur effectue les opérations suivantes :

Cellule **s** ⇨ calcul du total des puissances mécaniques carré t de freinage $P_{mFr}^2 t = \Sigma\, p_{miFr}^2 . t_i$

avec $P_{mFr}^2 t$ total des $p_{miFr}^2 . t_i$ élémentaires (colonne **k**)
Le tableur effectue la *sommation* ligne à ligne des valeurs $p_{miFr}^2 . t_i$ rangées dans la colonne **k**.

Cellule **t** ⇨ calcul de la somme des courants induits carré t $I_{induit}^2 t = \Sigma\, i_{induit}^2 . t_i$

avec $I_{induit}^2 t$ total des $i_{induit}^2 . t_i$ élémentaires (colonne **j**)
Le tableur effectue la *sommation* ligne à ligne des valeurs $i_{i\ induit}^2 . t_i$ rangées dans la colonne **j**.

Cellule **u** ⟹ calcul du courant induit efficace sur cycle I_{induit} **eff =** $\sqrt{I_{induit}^2 t / T}$

avec I_{induit} **eff.** courant induit efficace sur cycle par moteur en ampères (**A**)
I_{induit}^2 **t** somme des $i_{induit}^2 . t_i$ des phases élémentaires (cellule **t**)
T durée totale du cycle (cellule **Tt**)

Pour obtenir la valeur du courant induit efficace sur cycle pour chacun des moteurs du mouvement, le tableur effectue l'extraction de la racine carrée de la somme des i_{induit}^2**. T** dont la valeur est stockée dans la cellule **t**.

Cellule **v** ⟹ calcul de la puissance délivrée par le variateur $P_{variat.}$ **=** $U_{ind.}$ **.** $I_{ind.}$ **eff . N**$_{bre}$ **mot.**

avec $P_{variat.}$ puissance du variateur en kilowatts **(kW)**
$U_{ind.}$ tension induit par moteur en volts (cellule U_d)
$I_{ind.}$ **eff** courant induit efficace par moteur (cellule **u**) en ampères **(A)**
N_{bre} mot. Nombre de moteurs équipant le mouvement (cellule **Y**)

La puissance du variateur est obtenue par le tableur en effectuant le produit de la tension induit, du courant efficace sur cycle par moteur et du nombre de moteurs.

Cellule **w** ⟹ calcul de la somme des puissances apparentes ligne carré t P_{app}^2 **t =** $\Sigma\, p_{i\,app}^2 . t_i$

avec P_{app}^2 **t** total des $p_{i\,app}^2 . t_i$ élémentaires (colonne **p**)

Le tableur effectue la *sommation* ligne à ligne des valeurs $p_{iapp}^2 . t_i$ rangées dans la colonne **p**.

Cellule **x** ⟹ calcul de la somme des puissances actives ligne carré t P_{active}^2 **t =** $\Sigma\, p_{i\,active}^2 . t_i$

avec P_{active}^2 **t** total des $p_{i\,active}^2 . t_i$ élémentaires (colonne **q**)

Le tableur effectue la *sommation* ligne à ligne des valeurs $p_{iactive}^2 . t_i$ rangées dans la colonne **q**.

Cellule **y** calcul de la somme des puissances réactives ligne carré t $P_{réact}^2$ **t =** $\Sigma\, p_{i\,réact}^2 . t_i$

avec $P_{réact}^2$ **t** total des $p_{i\,réact}^2 . t_i$ élémentaires (colonne **r**)

Le tableur effectue la *sommation* ligne à ligne des valeurs $p_{i\,réact}^2 . t_i$ rangées dans la colonne **r**.

Cellule **z** ⟹ calcul de la puissance électrique apparente sur cycle $P_{élect;app.}$ **=** $\sqrt{\Sigma\, p_{app}^2 . t_i / T}$

soit P_{app} **=** $\sqrt{P_{app}^2 t / T}$

avec P_{app} puissance apparente sur cycle en kilovoltampères (**kVA**)
P_{app}^2 **t** total des $p_{app}^2 . t_i$ (cellule **w**)
T durée totale du cycle (cellule **Tt**)

Pour obtenir la puissance apparente sur cycle, le tableur effectue l'extraction de la racine carrée de la somme des p_{app}^2**. t** dont la valeur est stockée dans la cellule **w**.

Cellule **aa** ⟹ calcul de la puissance électrique active sur cycle $P_{élect;active}$ **=** $\sqrt{\Sigma\, p_{act}^2 . t_i / T}$

soit P_{active} **=** $\sqrt{P_{act}^2 t / T}$

avec P_{active} puissance active sur cycle en kilowatts (**kW**)
P_{act}^2 **t** total des $p_{act}^2 . t_i$ (cellule **x**)
T durée totale du cycle (cellule **Tt**)

Pour obtenir la puissance active sur cycle, le tableur effectue l'extraction de la racine carrée de la somme des p_{act}^2**. t** dont la valeur est stockée dans la cellule **x**.

Cellule **ab** ⟹ calcul de la puissance électrique réactive sur cycle $P_{élect;réact.} = \sqrt{\Sigma\, p_{réact.}^2 . t_i / T}$

soit $P_{réact.} = \sqrt{P_{réact.}^2\, t / T}$

avec $P_{réact.}$ puissance réactive sur cycle en kilovars (**kVar**)
$P_{réact.p}^2\, t$ total des $p_{réact.p}^2 . t_i$ (cellule **y**)
T durée totale du cycle (cellule **Tt**)

Pour obtenir la puissance réactive sur cycle, le tableur effectue l'extraction de la racine carrée de la somme des $p_{réact}^2 . t$ dont la valeur est stockée dans la cellule **y**.

Cellule **ac** ⟹ calcul du facteur de puissance du réseau sans batterie de relèvement du cos φ :

$$\cos \varphi = P_{act} / P_{app}$$

Le tableur effectue le *rapport* des valeurs des puissances active et apparente rangées respectivement dans les cellules aa et z.

Cellule **ad** ⟹ calcul de la valeur de la batterie de relèvement du cos pour respecter un facteur de puissance imposé par l'exploitant de la machine :

$$Q_{Batt} = P_{réact.} - P_{acti} . tg ((arc\ cos(Fp))$$

Le tableur effectue la *différence* entre la valeur de la puissance réactive calculée cellule **ab** et le produit de la puissance active calculée cellule **aa** par la tangente de l'arc du facteur de puissance imposé cellule **Fp**.

Nota:

L'exemple décrit ci-dessus est représentatif du mouvement vertical. La présentation des tableaux des modèles de calcul (feuilles 2 et 4) diffère sensiblement selon le type de mouvement étudié.

- Pour les mouvements horizontaux, l'influence de l'intensité du vent entraîne le triplement des colonnes relatives aux intensités et puissances électriques (vent nul, moyen et maximal).
- Pour l'application benne nous retrouverons, en plus des informations de puissances électriques et de courants pour chacun des treuils (suspension - fermeture), la globalisation des puissances des deux mouvements conformément à l'exemple du tableau N°7 ci-dessous. Ce sont ces valeurs qui seront utilisées pour calculer et éventuellement corriger le facteur de puissance du réseau ainsi que les résistances de freinage si celles-ci sont nécessaires.

		FERMETURE						LIGNE				
PHASES CYCLE		I carré t mot.CC	COSINUS	P appar réseau en VA	P act. réseau en W	P réact. réseau en Var	P carré t freinage	P récup. en W	P appar carré t réseau	P active carré t réseau	P réact. carré t réseau	P carré t freinage
0	ARRET	0,00E+00	1,00	0	0	0	0,00E+00	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
1	ACC.FERM.SUR TAS	1,70E+04	0,39	53729	20417	49699	0,00E+00	0	3,36E+09	5,08E+08	2,85E+09	0,00E+00
	VIT.STAB.FERMETU	7,64E+04	0,75	92966	68795	62530	0,00E+00	0	8,90E+09	4,83E+09	4,06E+09	0,00E+00
	RALENT.FERMETURE	2,60E+04	0,39	66436	25246	61453	0,00E+00	0	4,54E+09	6,61E+08	3,88E+09	0,00E+00
2	ARRET	0,00E+00	1,00	0	0	0	0,00E+00	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	EQUILIBRAGE	3,18E+03	0,04	46483	23241	40255	0,00E+00	0	8,64E+09	2,16E+09	6,48E+09	0,00E+00
4	ACC. MONT. CHARGE	3,52E+04	0,39	77258	29358	71462	0,00E+00	0	2,39E+10	3,45E+09	2,04E+10	0,00E+00
	VIT. STAB. MONTEE	7,00E+04	0,75	46483	34397	31265	0,00E+00	0	8,64E+09	4,73E+09	3,91E+09	0,00E+00
	RALENT. MONTEE	2,35E+03	0,39	19953	7582	18457	0,00E+00	0	1,59E+09	2,30E+08	1,36E+09	0,00E+00
N	dernière phase N	x,xxE+xx	X,XX	X VA.	X watts.	X Var.	x,xxE+xx	X watts.	x,xxE+xx	x,xxE+xx	x,xxE+xx	x,xxE+xx
								ae	**af**	**ag**	**ah**	**ai**

Tableau 7

Cellule **ae** ⟹ calcul des puissances mécaniques totales de freinage élémentaires

$$P_{TOTAL\ frein.} = \Sigma\ (p_{frein.susp.} + p_{frein.sferm.}) \quad \text{en } \mathbf{W}$$

Le tableur effectue ligne à ligne la sommation des puissances mécaniques de freinage des mouvements de suspension et de fermeture

Cellule **af** ⟹ calcul des puissances apparentes ligne carré t élémentaires $p_{i\ app}^{\ 2}\ t_i$

avec $p_{i\ app}$ somme des puissances apparentes élémentaires suspension et fermeture
t_i durée d'une étape élémentaire du cycle

Cellule **ag** ⟹ calcul des puissances active ligne carré t élémentaires $p_{i\ active}^{\ 2}\ t_i$

avec $p_{i\ active}$ somme des puissances actives élémentaires suspension et fermeture
t_i durée d'une étape élémentaire du cycle

Cellule **ah** ⟹ calcul des puissances réactives ligne carré t élémentaires $p_{i\ réact}^{\ 2}\ t_i$

avec $p_{i\ réact}$ somme des puissances réactives élémentaires suspension et fermeture
t_i durée d'une étape élémentaire du cycle

Cellule **ai** ⟹ calcul de la puissance mécanique totale carré t de freinage $P_{miFr}^{\ 2}\ t$

deux cas de figure sont à considérer :

- *régime stabilisé* de vitesse $P_{miFr}^{\ 2}\ t = p_{miFr}^{\ 2}\ t_i$
- régime *transitoire* de vitesse $P_{miFr}^{\ 2}\ t = 1/3\ p_{miFr}^{\ 2}\ t_i$
  (hypothèse d'une variation linéaire de la vitesse de 0 à ω stabilisée)

avec p_{miFr} somme des puissances mécaniques élémentaires de freinage (colonne **v**)
t_i durée d'une étape élémentaire du cycle

Calcul des résistances de récupération d'énergie sur le réseau

Le logiciel de calcul moteur permet de calculer dans le cas d'une motorisation par des machines à courant continu à excitation séparée, pilotées par des variateurs de vitesse 4 quadrants de type double ponts de graëtz antiparallèles, les dispositifs à mettre en place au niveau du réseau d'alimentation pour absorber l'énergie de freinage. Ce dispositif est nécessaire en particulier lorsque le réseau d'alimentation est constitué par un groupe électrogène (diesel-alternateur). Les moteurs diesels d'entraînement n'ont qu'une faible capacité d'absorption de l'énergie de freinage (10% à 15% de la puissance nominale selon la technologie de construction).

Le logiciel permet de définir, pour un montage en étoile de résistances couplées au réseau pendant les phases de freinage, les données techniques suivantes :

- la puissance efficace sur cycle de l'ensemble des 3 résistances en kilowatts **(kW)**,
- la puissance crête que doivent supporter les résistances dans les phases transitoires de fonctionnement **(kW)**,
- la valeur ohmique de chaque résistance exprimée en milliohms **(mΩ).**

Ces 3 résultats de calcul figurent dans le tableau de la dernière feuille des modèles pour moteurs à courant continu.

RESISTANCES de FREINAGE	**Puissance/cycle en kW**	**305**
	Puissance crête en kW	**1 327**
	Valeur en mOhm 3X	**121**

Tableau 8

Calcul de la puissance efficace sur cycle

Pour la détermination de la puissance efficace sur cycle, nous utiliserons la méthode de la somme des p carrés t afin d'obtenir la puissance thermique équivalente sur le cycle de durée T.
Par convention, nous appellerons :

$$P = \sqrt{\Sigma p_{miFr}^2 . t/T}$$

avec **P** la puissance efficace sur cycle en watts **(W)**
p_{miFr} la puissance mécanique élémentaire de freinage
t la durée d'une étape élémentaire du cycle
T la durée totale du cycle

Calcul de la puissance crête

Elle est obtenue en effectuant la recherche de la plus grande puissance mécanique négative au moyen du tableur. C'est cette valeur qui sera utilisée pour déterminer la valeur ohmique des résistances de freinage.
Par convention, nous l'appellerons **P_{max}**

Calcul de la valeur ohmique de chaque élément (montage étoile)

La tension réseau est appliquée aux bornes des 3 résistances de freinage au moyen d'un contacteur piloté pendant les périodes de fonctionnement en générateur du moteur d'entraînement.

Par convention, nous appellerons :

U_e la tension nominale du réseau d'alimentation en volts **(V)**
$P_{max} / 3$ la puissance maximale à dissiper par chacune des résistances de freinage **(kW)**
$U_e / \sqrt{3}$ la tension efficace simple vue par chacune des résistances de freinage en volts **(V)**

On obtient la valeur ohmique unitaire des résistances de freinage en appliquant la relation suivante :

$$r = (U_e / \sqrt{3})^2 / (P_{max} / 3)$$

soit après simplification:

$$r = U_e^2 / P_{max}$$

Nota :

Dans le cas d'un montage triangle des résistances, l'expression précédente devient :

$$r = U_e^2 / (P_{max} / 3)$$

soit encore :

$$r = 3 . U_e^2 / P_{max}$$

A noter enfin qu'en pratique, afin de réagir plus progressivement au niveau du diesel-alternateur, le groupe de résistances est scindé en 2 ou 3 éléments de valeur identique. La commande d'enclenchement de ces différents éléments est effectuée par l'automatisme qui calcule en temps réel la puissance consommée ou fournie par le moteur du mouvement. Le dimensionnement thermique des différentes sections de résistances devra alors tenir compte du service intermittent de celles ci.

23.1.4.3. Solution avec moteurs triphasés asynchrones

Rappels

Au cours du Chapitre 8 nous avons vu que les moteurs asynchrones, dits encore d'induction, sont basés sur l'entraînement d'une masse métallique par l'action d'un champ tournant. Ils comportent deux armatures à champ tournant coaxiales :

- l'une est fixe (**stator**)
- l'autre est mobile (**rotor**).

Le rotor n'est lié électriquement à aucune source d'énergie, ni continue, ni alternative, d'où sa simplicité de construction.

On distingue deux types de rotor :

- Le rotor à bagues

  C'est un cylindre feuilleté avec des encoches qui renferment un enroulement comportant le même nombre de pôles que celui du stator. En général le bobinage est de type triphasé couplé en étoile. Les extrémités libres des phases sont reliées à des bagues puis ramenées à un bornier de raccordement permettant de connecter éventuellement des résistances additionnelles pour faciliter le démarrage. Dans le cas d'association de ces machines avec des convertisseurs de fréquence, on court-crcuite parfois le rotor à travers une résistance de valeur voisine à celle du rotor afin d'augmenter la valeur de glissement.

- Rotor à cage .

  Dans ce cas, l'enroulement est remplacé par des barres de cuivre ou d'aluminium logées dans des encoches d'un induit feuilleté. Les extrémités de ces barres sont réunies au moyen de deux couronnes de cuivre ou d'aluminium.

Circuit équivalent

On démontre qu'une machine asynchrone est équivalente à un transformateur statique triphasé dont le secondaire de chacune de ses phases, supposé sans résistance, alimenterait une charge R_r / g .
Si l'on considère m le rapport de transformation d'une telle machine, on obtient les relations suivantes:

$$\mathbf{R'_r = m^2 . R_r} \qquad \mathbf{L'_r = m^2 . L_r} \qquad \mathbf{E_s = E'_r = - m . E_r}$$

Le schéma équivalent est souvent représenté par la figure ci-dessous :

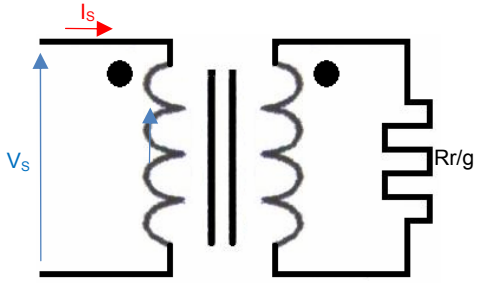

Fig. A23.1-6a

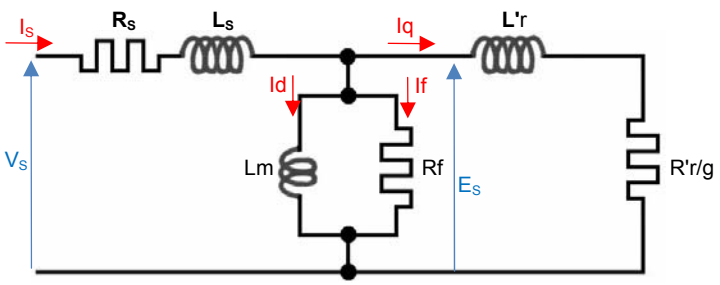

Fig. A23.1-6b

avec
- $\mathbf{L_s}$ l'inductance de fuite statorique,
- $\mathbf{R_s}$ la résistance statorique,
- $\mathbf{L_m}$ l'inductance mutuelle, inductance de magnétisation,
- $\mathbf{R_f}$ la résistance équivalente aux pertes fer à vide,
- $\mathbf{R'_r}$ la résistance rotorique équivalente,
- **g** le glissement avec $g = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s$,
- $\mathbf{L'_r}$ l'inductance de fuite rotorique équivalente.

- le stator fonctionne exactement comme le primaire du transformateur triphasé équivalent,
- le rotor se comporte comme le secondaire de ce transformateur mais avec un courant généré de pulsation $g\omega$.

L'expression du courant rotorique par phase équivalent vue du stator est la suivante :

$$I'_r = \frac{E_S}{\sqrt{(R'_r/g)^2 + L'^2_r \cdot \omega^2}}$$

Décomposition vectorielle des courants statoriques

Comme pour un transformateur, le courant à vide ou courant magnétisant a deux composantes :

- une composante active $\mathbf{I_f}$ qui est due aux pertes fer circulant à travers la branche $\mathbf{R_f}$ du schéma précédent,
- une composante réactive $\mathbf{I_d}$ nécessaire pour entretenir le flux dans l'entrefer de la machine.

  Il est intéressant de remarquer par ailleurs que cette composante est très nettement supérieure dans le cas d'un moteur asynchrone à celle du transformateur à cause de la taille beaucoup plus grande de l'entrefer.

Si nous admettons que la composante $\mathbf{I_f}$ est très petit devant $\mathbf{I_d}$ ($\mathbf{I_f} << \mathbf{I_d}$) nous pouvons construire le diagramme vectoriel simplifié ci-dessous :

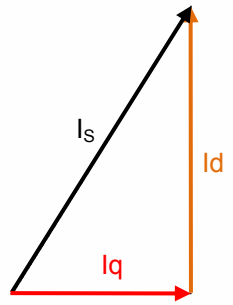

Fig. A23.1-7a

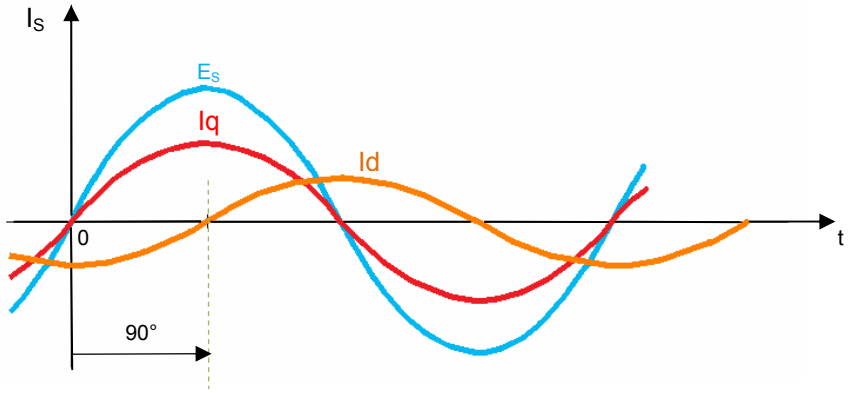

Fig. A23.1-7b

avec $\mathbf{L_s}$ et $\mathbf{L_r}$ négligeables (inductances de fuite statorique et rotorique)

$$\vec{I_s} = \vec{I_q} + \vec{I_d}$$

Nous exploiterons au niveau du modèle de détermination des moteurs, cette propriété de séparation des composantes du courant statorique absorbé par le moteur asynchrone.

- Le courant $\vec{I_d}$ est maintenu constant dans le domaine de fonctionnement à couple constant (de 0 à la vitesse nominale),
- L'amplitude du courant $\vec{I_q}$ est variable et peut être considérée proportionnelle au couple transmis à l'arbre du moteur si ce dernier fonctionne dans le domaine **linéaire** de sa caractéristique de glissement.

La composante réactive $\vec{I_d}$ de l'intensité absorbée au stator peut être déterminée à partir des données fournies par les constructeurs des moteurs aux caractéristiques nominales de la machine ($\mathbf{P_n}$, $\mathbf{I_n}$, $\mathbf{U_n}$, $\mathbf{F_n}$ et **cosinus** φ_n).

La composante réactive $\vec{I_d}$ est obtenue par la relation suivante :

$$\mathbf{I_d = I_s \,.\, sinus\,[arc\,(cosinus\,\varphi_n)]}$$

bilan des puissances

A chaque instant, le moteur absorbe au réseau la puissance active $\mathbf{Pst_a}$:

$$\mathbf{Pst_a = \sqrt{3} \,.\, U_e \,.\, I_s \,.\, cosinus\,\varphi}$$

avec $\mathbf{U_e}$ tension d'alimentation entre phases
$\mathbf{I_s}$ courant apparent phases statoriques

Si nous négligeons les pertes fer au stator (1 à 2%) et les pertes cuivre dues à l'effet joule ($\mathbf{P_{js} = 3/2.R.I^2}$),nous obtenons la puissance restante transmise au rotor par le champ tournant de vitesse angulaire ω_s sous forme de puissance électromagnétique soit :

$$P_e = Pst_a - (P_{fs} + P_{js}) \cong Pst_a$$

d'où

$$\mathbf{Pst_a = C \,.\, \omega_s}$$

Or, la puissance mécanique fournie par le rotor s'exprime par la relation :

$$\mathbf{P_m = C \,.\, \omega_r}$$

On en déduit ainsi la puissance $\mathbf{P_{jr}}$ perdue par effet joule au rotor :

$$P_{jr} = Pst_a - P_m = C \,.\, (\omega_s - \omega_r)$$

soit encore

$$\mathbf{P_{jr} = Pst_a \,.\, g}$$

Le rendement du rotor s'exprime alors par l'équation suivante :

$$\eta_r = \frac{P_{sta} - P_{jr}}{P_{sta}} \quad \Rightarrow \quad \eta_r = 1 - g$$

Caractéristiques fondamentales

Sur les deux courbes ci-dessous sont représentées les allures des courbes caractéristiques de couple et d'intensité des moteurs asynchrones courantes. La caractéristique de couple présente une valeur maximale C_m encore appelée couple de décrochage.
Le rapport C_m / C_n dépend de la technologie des machines (forme des encoches, nature des conducteurs du rotor).

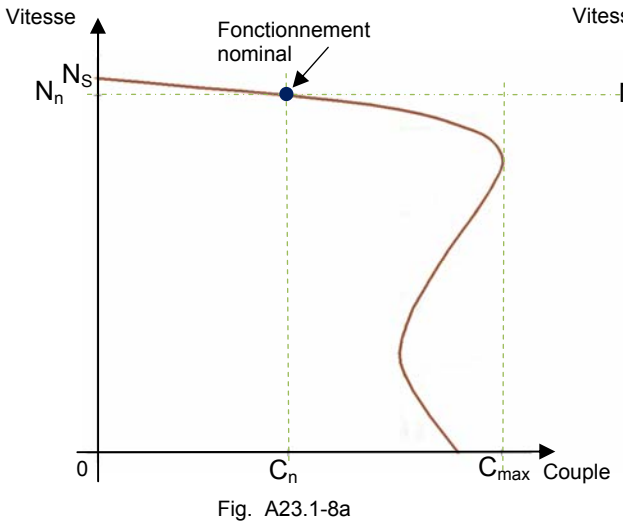

Fig. A23.1-8a

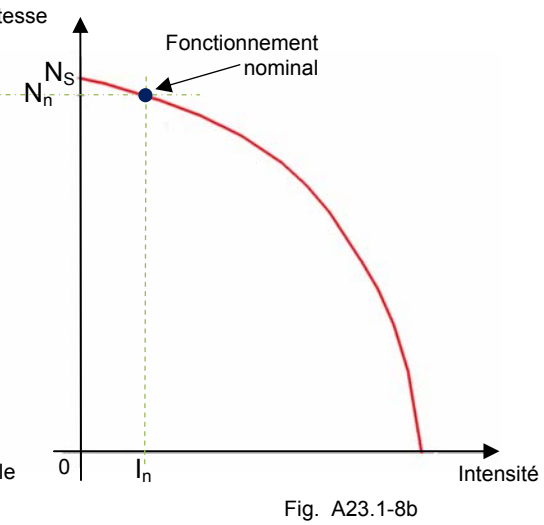

Fig. A23.1-8b

La caractéristique de couple peut se calculer à partir de l'expression des pertes joules au rotor vue précédemment:

$$\mathbf{P_{jr} = Pst_a \,.\, g = C \,.\, \omega_s \,.\, g = k \,.\, R'_r \,.\, I'^2_r}$$

avec

$$I'_r = \frac{E_S}{\sqrt{\left(R'_r/g\right)^2 + L'^2_r \cdot \omega^2}}$$

d'où la relation classique du couple:

$$C = K \cdot V_S^2 \cdot \frac{R'_r/g}{\sqrt{\left(R'_r/g\right)^2 + L'^2_r \cdot \omega^2}}$$

Cette relation entraîne les remarques fondamentales suivantes :

- à fréquence constante de la tension d'alimentation du moteur asynchrone, le couple disponible à l'arbre évolue avec le **carré de cette tension**
- le couple qui est nul à la vitesse de synchronisme, passe par un **maximum (Cm)**.
  Cette valeur est atteinte lorsque le dénominateur de l'expression du couple ci-dessus est minimum, c'est à dire que les deux termes sont égaux (le produit des deux termes est constant).
  Cette condition est remplie lorsque le glissement **g** est tel que :

  $$\mathbf{g = R'_r / L'_r \omega} \quad .$$

- la valeur maximale du couple devient :

  $$C_m = K \cdot V_S^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot L \cdot \omega}$$

  L'expression de C est **indépendante de g et de R'r**

Remarque 1:

Le domaine de fonctionnement doit être limité à la zone sensiblement rectiligne de la caractéristique.
En effet, si, en cours de fonctionnement, le couple résistant dépasse la valeur du couple maximal, le moteur s'arrête dans le cas d'un mouvement non entretenu, on dit qu'il décroche. Cette situation peut être bien plus dangereuse pour les mouvements verticaux qui utilisent ces machines car la perte de couple entraîne alors de façon inévitable le dévirage de la charge.
Il faut remarquer par ailleurs que dans cette situation de décrochage de la machine, le courant absorbé à tendance à augmenter considérablement et ceci jusqu'à une valeur limite imposée par les variateurs de vitesse par réduction de la tension appliquée au stator. Cela a alors pour effet d'accélérer le phénomène de perte de couple.
En conséquence, il est donc indispensable de **conserver une marge de sécurité** suffisante entre le couple mécanique maximal à développer (ralentissement en charge en descente par exemple) et le couple de décrochage du moteur

Remarque 2:

Lorsque le moteur fonctionne à une fréquence supérieure à la fréquence nominale, la tension d'alimentation n'augmente plus d'où le non respect de la loi de variation U/F = constante.
Il en résulte alors une décroissance du flux de la machine dans un rapport k_{df} = Fnom / f ce qui entraîne les conséquences suivantes :

- à glissement g constant, le nombre de tours glissés augmente dans un rapport voisin de **f / Fnom**
- le couple moteur diminue dans le rapport inverse **Fnom / f**
- le couple maximal du moteur **diminue avec le carré de l'augmentation de fréquence** **(Fnom / f)**^{2}

Analogie avec les machines à courant continu

Considérons les deux schémas ci-dessous:

Moteur à courant continu

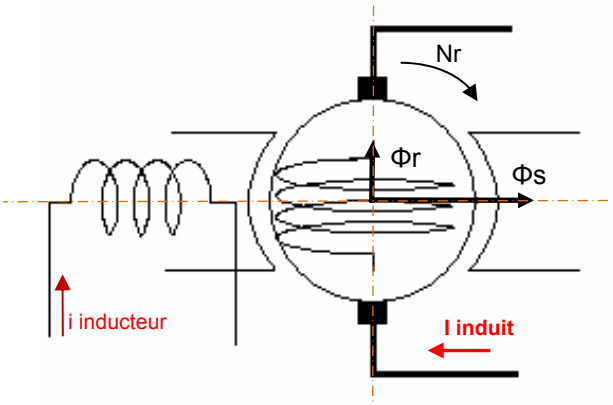

Fig. A23.1-8a

$$\phi_s = k \cdot i$$

$$C = k \cdot \phi_s \cdot I$$

Moteur asynchrone

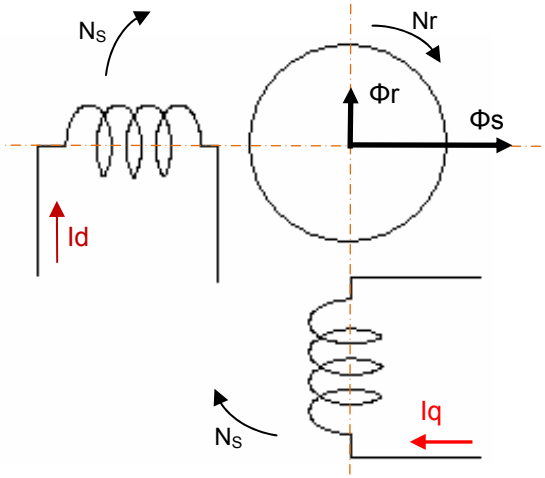

Fig. A23.1-8b

$$\phi_s = k_1 \cdot I_d$$

$$C = k_2 \cdot \phi_s \cdot I_q$$

On constate en comparant les deux schémas simplifiés et les relations fondamentales qui les régissent, que les deux types de machines répondent aux mêmes lois de la physique.

En fait, dans le cas de la machine à courant continu, le flux qui est imposé par l'enroulement d'excitation séparé (quasiment indépendant du courant induit si l'on néglige la réaction magnétique d'induit) se trouve naturellement en quadrature grâce au calage des balais sur la ligne neutre. Si l'on utilise les notations vectorielles, l'équation de couple s'exprime alors de façon tout à fait générale par la relation:

$$\vec{C} = (\vec{\phi_s} \wedge \vec{I})$$

Pour une machine à courant continu, le pilotage traditionnel est donc un pilotage vectoriel.

L'asservissement de la vitesse d'une machine, nécessite d'être maître à la fois du couple et du flux. Ces deux paramètres de réglage sont naturellement accessibles sur une machine à courant continu à excitation séparée, mais il n'en est pas de même pour une machine asynchrone à cage. En effet, dans ce cas nous ne disposons que d'une seule entrée de commande de la machine: les bornes des enroulements du stator.

Si pour une machine asynchrone, la vitesse de rotation dépend de la fréquence de l'alimentation (en négligeant le glissement), le flux ϕ dépend du rapport U/f au rotor. Malheureusement, les grandeurs rotoriques ne sont pas accessibles électriquement. C'est pourquoi, si l'on désire obtenir avec une machine asynchrone des performances identiques à celles obtenues avec une machine à courant continu, il faut obligatoirement réguler les grandeurs rotoriques. Pour réguler ces grandeurs rotoriques, il faut connaître parfaitement les paramètres moteur et distinguer au niveau du rotor les vecteurs flux et courant actif.

Les convertisseurs de fréquence modernes intègrent des modèles mathématiques des machines asynchrones ce qui permet de contrôler parfaitement la forme d'onde du courant fondamental de la machine (ENA System pour le variateur de vitesse TELEMECANIQUE ALTIVAR 71).

23.1.4.4. Tableau récapitulatif des résultats de calculs des modèles pour moteurs asynchrones

Entrée des données complémentaires pour les moteurs AC

Ces données concernent essentiellement les caractéristiques du (ou des) moteur(s) du mouvement, ainsi que du choix de préfluxer ou non les moteurs au cours des phases d'arrêt des mouvements. Elles sont à renseigner dans les cellules grisées de la première feuille des différents logiciels ce calcul selon le modèle suivant :

SOLUTION MOTEUR A COURANT ALTERNATIF			
Rendement moteur (%)	η	Puissance nominale (kW)	P_n
Tension stator en V	U_S	Vitesse nominale (tr/mn)	V_n
Coefficient sur le courant	K_I		
Cosinus moteur	cos_{mot}	Cmax/Cnom	K_C
Préfluxage à l'arrêt 1 = oui 0 = non	P_{flux}		
REFERENCE MOTEUR (S):	Exemple : **ANGA 315 MC 06**		

Tableau 9

Cellule η_{mot} ⟹ rendement du moteur (pertes magnétiques et par effet joule)

Cellule **Us** ⟹ tension nominale du stator du moteur en volts (V)

Cellule K_I ⟹ facteur de correction de l'intensité du courant stator.

Il permet de prendre en compte le fait que les moteurs n'ont pas des caractéristiques de glissement parfaitement linéaire.
Il en résulte une non proportionnalité entre le couple disponible sur l'arbre et le courant absorbé. Ce coefficient K_I est ≥ 1.
Dans le cas de l'utilisation d'un moteur asynchrone où le couple maximum est important ($Cm \geq 3\ Cn$), si l'application nécessite un ratio de sur-couple mécanique $Cd / Cn \leq \mathbf{2}$, nous retiendrons $\mathbf{K_I} = 1$

Cellule $\mathbf{cos_{mot}}$ ⟹ valeur du cosinus à la puissance nominale du moteur asynchrone choisi

Cellule $\mathbf{P_{flux}}$ ⟹ cette case doit être complétée par 1 ou 0 selon le choix retenu ci-dessous:

- si 0 : absence de préfluxage durant les phases d'arrêt du mouvement
- si 1 : préfluxage du moteur durant les phases d'arrêt

Le fait de réaliser un préfluxage à l'arrêt de la machine, c'est à dire de faire traverser le stator par le courant de magnétisation, permet en particulier dans le cas des mouvements verticaux de réduire le temps de levée de frein à la seule constante d'établissement du courant actif.

Il y a une analogie parfaite avec les moteurs à courant continu, puisque pour les fonctionnements des machines à cycles le courant d'excitation n'est pas interrompu entre deux phases de fonctionnement consécutives.

Dans le cas des machines asynchrones autoventilées, il faudra tout particulièrement veiller à l'aspect thermique de ce mode de fonctionnement des moteurs (courant stator important et moteur à l'arrêt).

Cellule $\mathbf{P_n}$ ⟹ puissance nominale normalisée du moteur choisi en kilowatts (kW)

La valeur de la puissance nominale du moteur choisi sera retenue parmi les valeurs normalisées immédiatement supérieures à la puissance nominale mécanique calculée par le logiciel figurant sur la feuille 2 des différents modèles.
Cette valeur sera ensuite exploitée à l'aide du tableur afin de calculer les intensités réelles présumées ainsi que les ratios de couples Cd/Cn correspondants.

Cellule $\mathbf{V_n}$ ⟹ vitesse nominale du moteur en tours par minute (tr/mn)

Cellule $\mathbf{K_C}$ ⟹ rapport entre le couple maximum et le couple nominal du moteur

Remarque 1 :

Les cellules relatives au ratio de couple Cd/Cn et le nombre de moteurs ont déjà étaient présentées précédemment au cours de la détermination de la Puissance nominale mécanique du moteur.

Pour la détermination des machines asynchrones, il faudra éviter d'utiliser des ratios de couple élevés afin de rester dans le domaine de linéarité satisfaisant de la courbe de glissement.
Utiliser par défaut la valeur de 1,7 qui convient à l'usage dans la majorité des cas.

ATTENTION

Toute valeur supérieure 1,7 du ratio Cd /Cn mérite une attention particulière et la connaissance des **caractéristiques précises du constructeur** du moteur.

Remarque 2 :

La feuille 1 du tableur comporte également une zone prévue pour le renseignement de la référence du moteur retenu pour effectuer la simulation (ANGA 315 MC 06 pour les besoins de notre exemple).

Tableau des résultats de calcul

A partir de ces données complémentaires et des résultats des calculs mécaniques vus précédemment, le tableur effectue pour chaque phase élémentaire les opérations dont les résultats sont rangés respectivement dans les colonnes nommées de **a** à **l** et dans les cellules de **m** à **w** du tableau 10 ci-après :

		a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
PHASES CYCLE		P élect actif en W	I apparent stator en A	I actif stator en A	I réactif stator en A	I apparent stator en A	I apparent carré t mot.Asyn	P élect apparent en VA	P élect apparent carré t	P élect actif en W	P élect actif carré	P carré t freinage	COSINUS
0	ARRET												
1	ACC.MONT.charge												
	VIT.STAB.MONTEE												
	RALENT.MONTEE												
2	ARRET												
3	ACC.DESC.charge												
	VIT.STAB.DESCENTE												
	RALENT.DESCENTE												
4	ARRET												
N	dernière phase N												

m		Intensité eff.maxi en A du variateur
n		Cosinus moteur équivalent sur cycle
o		Puissance thermique en kW par moteur
p		Intensité efficace en A par moteur
q		Puissance du variateur en kVA

r		Intensité nom.réactive en A par moteur
s		Intensité nom.active en A par moteur
t		Intensité nom.appar. en A par moteur
u		Couple nominal en Nm par moteur
v		Ratio réel Cd/Cn du moteur
w		**TOTAL P carré t Résist. de freinage**

Tableau 10

Pour chacune des phases élémentaires du cycle du mouvement, le tableur effectue les opérations de report et de calcul figurant dans les colonnes de a à l et les cellules m à w détaillées ci-après :

Colonne **a** ⟹ calcul de la puissance électrique active totale $P_{élec} = P_{élec\ mot.} . N_{bre mot.}$ **(W)**

La puissance électrique active totale absorbée ou renvoyée au réseau est équivalente à la puissance électrique active de chaque moteur calculée colonne t multipliée par le nombre de moteurs du mouvement (case **Y** page 11)

Colonnes **b et e** ⟹ calcul du courant apparent stator par moteur $\sqrt{i_{i\,act}^2 + i_{i\,réact}^2}$ **(A)**

Pour obtenir le courant apparent de chaque phase élémentaire du cycle, le tableur effectue l'extraction de la racine carrée ligne à ligne de la somme du carré des intensités actives i_{act}^2 et réactives $i_{réact}^2$ dont les valeurs sont stockées dans les colonnes **c** et **d**.

Colonne **c** ⟹ calcul du courant actif stator par moteur à l'aide de la relation suivante :

$$i_{i\,act} = |Cr+Ca| / N_{bre}\ mot. / C_{n}réel . In_{act} \quad \textbf{(A)}$$

avec $|Cr+Ca|$ valeur absolue de la sommation du couple résistant Cr et du couple accélérateur ou de ralentissement Ca (colonne **d** page 15)
In_{act} intensité nominale active du moteur calculée et rangée case **s**
C_{n}réel couple nominal calculé du moteur normalisé choisi (case **u**)
N_{bre}mot. nombre de moteurs du mouvement (case **Y** page 11)

Colonne **d** ⟹ report du courant réactif stator par moteur $i_{réact}$ **(A)**

deux cas de figure sont à considérer selon l'état de préfluxage à l'arrêt du moteur :

- si ***oui*** :il y a report automatique à chacune des phases élémentaires de la valeur du courant réactif calculé du moteur et stockée dans la case **r**
- si ***non*** : ce report ne s'effectue pas pour les phases d'arrêt car dans ce cas le courant réactif est nul.

Colonne **f** ⟹ calcul des courants apparents carré t élémentaires $i_{i\,app}^2\ t_i$

avec $i_{i\,app}$ courant apparent stator élémentaire (colonne **e**)
t_i durée d'une étape élémentaire du cycle

Colonne **g** ⟹ calcul de la puissance électrique apparente moteur par la relation:

$$p_{i\,app} = \sqrt{3} . U_{sta} . i_{i\,app} \quad \textbf{(VA)}$$

avec U_{sta} tension d'alimentation entre phases du moteur (case **Us**)
$i_{i\,app}$ intensité apparente stator du moteur (colonne **e**)

Colonne **h** ⟹ calcul des puissances apparentes moteur carré t élémentaires $p_{apparente}^2\ t_i$

avec $p_{i\,app}$ puissance électrique apparente élémentaire (colonne **g**)
t_i durée d'une étape élémentaire du cycle

deux cas de figure sont à considérer :

- le régime *stabilisé* de vitesse $p_{app}^2\ t = p_{i\,app}^2\ t_i$
- le régime *transitoire* de vitesse $p_{app}^2\ t = 1/3\ p_{i\,app}^2\ t_i$ (hypothèse d'une variation linéaire de la vitesse de 0 à ω stabilisée donc de la tension stator du moteur)

Colonne **i** ⟹ calcul des puissances actives moteur élémentaires

$$p_{i\,act} = \sqrt{3} . U_{sta} . i_{i\,act} \quad \textbf{(W)}$$

avec U_{sta} tension d'alimentation entre phases du moteur (case **Us**)
$i_{i\,act}$ intensité active stator du moteur (colonne **c**)

Colonne **j** ⇨ calcul des puissances actives moteur carré t élémentaires $p_{active}^2 t_i$

avec $p_{i\ act}$ puissance électrique active élémentaire (colonne **i**)
t_i durée d'une étape élémentaire du cycle

deux cas de figure sont également à considérer :

- le régime *stabilisé* de vitesse $p_{act}^2 t = p_{i\ act}^2 t_i$
- le régime *transitoire* de vitesse $p_{act}^2 t = 1/3\ p_{i\ act}^2 t_i$
  (hypothèse d'une variation linéaire de la vitesse de 0 à ω stabilisée donc de la tension stator du moteur)

Colonne **k** ⇨ calcul de la puissance mécanique carré t de freinage $p_{mFr}^2 t_i$

Si au cours de la phase élémentaire considérée la puissance mécanique est négative, il y a alors le report automatique dans la case correspondante de la colonne de la valeur $p_{mi}^2 . t_i$ calculée précédemment (chapitre détermination du couple nominal page 15).

Colonne **l** ⇨ calcul du **cosinus** φ du moteur à chaque phase élémentaire à l'aide de la relation suivante :

$$p_{i\ act} / p_{i\ app}$$

avec $p_{i\ act}$ la puissance active élémentaire (colonne **i**)
$p_{i\ app}$ la puissance apparente élémentaire (colonne **g**)

Cellule **m** ⇨ calcul de l'intensité efficace apparente maximale à délivrer par le variateur

avec $I_{app.max}$ **var.** = $I_{app.max}$ mot. **.** N_{bre}mot

Le tableur effectue la recherche de la plus grande valeur du courant apparent absorbé par chacun des moteurs puis effectue le produit de cette valeur avec le nombre de moteurs du mouvement.

Cellule **n** ⇨ calcul du cosinus moteur équivalent sur cycle élémentaire à l'aide de la relation suivante :

$$\sqrt{\Sigma\ P_{act}^2\ t_i / \Sigma\ P_{app}^2\ t_i}$$

avec $\Sigma\ P_{act}^2\ t_i$ total des $p_{i\ active}^2 . t_i$ élémentaires (colonne **j**)
$\Sigma\ P_{app}^2\ t_i$ total des $p_{i\ apparente}^2 . t_i$ élémentaires (colonne **h**)

Après avoir effectué la *sommation* ligne à ligne des valeurs élémentaires $p_{i\ active}^2 . t_i$ et $p_{i\ apparente}^2 . t_i$ rangées respectivement dans les colonnes **j et h**, le tableur en effectue la *division* puis l'extraction de la *racine carré*.

Cellule **o** ⇨ calcul de la puissance thermique par moteur à l'aide de la relation suivante :

$$P_{therm} = \sqrt{\Sigma\ p_{i\ app}^2\ t_i / T}\ / 1000 \quad \textbf{(kW)}$$

avec $\Sigma\ p_{i\ app}^2\ t_i$ total des $p_{i\ apparente}^2 . t_i$ élémentaires (colonne **h**)
T durée totale du cycle (cellule **Tt**)

Après avoir effectué la *sommation* ligne à ligne des valeurs $p_{i\ apparente}^2 . t_i$ rangées dans la colonnes **h**, le tableur en effectue la *division* par la durée totale du cycle rangée dans la case **Tt** puis l'extraction de la *racine carré*.

Cellule **p** ⇨ calcul de l'intensité efficace par moteur à l'aide de la relation suivante :

$$I_{therm} = \sqrt{\Sigma\ i_{i\ app}^2\ t_i / T} \quad \textbf{(A)}$$

avec $\Sigma\ i_{i\ app}^2\ t_i$ total des $i_{i\ apparente}^2 . t_i$ élémentaires (colonne **p**)

Le tableur effectue la *sommation* ligne à ligne des valeurs $i_{i\ apparente}^2 . t_i$ rangées dans la colonne **p** en effectue la *division* par la durée totale du cycle rangée dans la cellule **Tt** puis l'extraction de la *racine carré*.

Cellule **q** ⇨ calcul de la puissance du variateur $\mathbf{P_{variat.} = Us . I_{therm} . \sqrt{3} . N_{bre}\ mot.}$

avec
- $\mathbf{P_{variat.}}$ puissance du variateur **(kVA)**
- $\mathbf{U_{stator}}$ tension stator du (ou des) moteur(s) en volts (cellule $\mathbf{U_s}$)
- $\mathbf{I_{therm}}$ courant stator eff. sur cycle par moteur (cellule **p**) **(A)**
- $\mathbf{N_{bre}}$ mot. Nombre de moteurs équipant le mouvement (cellule **Y**)

La puissance du variateur est obtenue par le tableur en effectuant le produit de la tension stator, du courant efficace sur cycle (apparent) par moteur et du nombre de moteurs.

Cellule **r** ⇨ calcul de l'intensité réactive par moteur $\mathbf{I_{réact} = In . sinus\ \varphi}$ **(A)**

avec
- **In** intensité nominale calculée (apparente) du moteur (cellule **t**)
- φ angle de déphasage entre les courants nominaux actif et réactif.

Il est déterminé à partir du cosinus catalogué du moteur choisi (cellule $\mathbf{Cos}_{mot}$).

Cellule **s** ⇨ calcul de l'intensité nominale active par moteur à l'aide de la relation suivante:

$$\mathbf{In_{act.} = Pn . Ki_{mot} / \eta_{mot} / U_{stator} / \sqrt{3}. 1000} \quad \textbf{(A)}$$

avec
- **Pn** puissance nominale du moteur **(kW)**
- $\mathbf{Ki}_{mot}$ facteur de correction de l'intensité du courant stator (cellule $\mathbf{Ki}_{mot}$)
- η_{mot} rendement du moteur (cellule η_{mot})
- $\mathbf{U_{stator}}$ tension stator du (ou des) moteur(s) (cellule $\mathbf{U_s}$) **(V)**

La puissance nominale **Pn** du ou des moteur(s) prise en compte dans le calcul est sélectionnée automatiquement par le tableur. C'est la plus grande des valeurs ci-dessous :

- **Pn =** puissance nominale minimale mécanique calculée par le tableur et ou stockée cellule $\mathbf{P_{nom}}$ (voir page 16)
- **Pn =** puissance nominale normalisée du moteur choisi (cellule **Pn**)

Cellule **t** ⇨ calcul de l'intensité nominale (apparente) par moteur $\mathbf{I_{stator}\ eff = In_{act.} / cosinus\ \varphi}$

avec
- $\mathbf{I_{stator}\ eff}$ courant nominal stator par moteur en ampères **(A)**
- $\mathbf{In_{act.}}$ courant actif nominal par moteur (case **s**)
- **cosinus** φ valeur plaquée du cosinus du moteur (case $\mathbf{Cos}_{mot}$)

Pour obtenir la valeur du courant nominal apparent efficace de chacun des moteurs du mouvement, le tableur effectue le quotient de l'intensité nominale active calculée précédemment par la valeur du cosinus de l'angle de déphasage des 2 courants stockée dans la case $\mathbf{Cos}_{mot}$.

Cellule **u** ⇨ calcul du couple nominal par moteur $\mathbf{Cn = Pn / \omega_r . 1000}$ **(Nm)**

avec
- **Pn** puissance nominale du moteur **(kW)**

Comme pour la détermination de l'intensité active nominale, la puissance nominale **Pn** du ou des moteur(s) prise en compte dans le calcul est sélectionnée automatiquement par le tableur. C'est la plus grande des valeurs ci-dessous:

- **Pn =** puissance nominale minimale mécanique calculée par le tableur et ou stockée case $\mathbf{P_{nom}}$ (voir page 16)
- **Pn =** puissance nominale normalisée du moteur choisi (cellule **Pn**)

ω_r vitesse nominale angulaire du rotor en radians par seconde **(rd/s)**

Cette valeur est obtenue à partir de la vitesse exprimée en tours par minute au moyen de la relation suivante :

$$\omega_r = 2 . \pi . Nn / 60$$

Nn est renseignée à la cellule **Vn**

Cellule **v** ⟹ calcul du ratio réel de couple Cd / Cn $k_{rc} = C_{max} / Cn / N_{bre\ mot.}$

avec C_{max} couple maximal $|Cr + Ca|$ **(Nm)**
Cn couple nominal du moteur retenu pour l'application (cellule **u**)
N_{bre} **mot.** Nombre de moteurs équipant le mouvement (cellule **Y**)

Le ratio réel de couple **Cd / Cn** est obtenu par le tableur en effectuant le *quotient* de la valeur absolue de la plus grande valeur **Cd = Cr + Ca** (colonne f page 15) par le nombre de moteurs du mouvement et le couple nominal **Cn** unitaire calculé précédemment (cellule **u**).

Cellule **w** ⟹ calcul de la puissance mécanique carré t de freinage $P_{mFr}^2\ t = \Sigma p_{miFr}^2\ t_i$

avec $P_{mFr}^2\ t$ total des $p_{miFr}^2 . t_i$ élémentaires (colonne **k**)

Le tableur effectue la *sommation* ligne à ligne des valeurs $p_{miFr}^2 . t_i$ rangées dans la colonne **k** et stocke le résultat dans la case **w** (somme des $p_{miFr}^2 . t$)

Nota:

Comme pour l'entraînement avec des moteurs à courant continu traité au cours du paragraphe précédent, l'exemple décrit ci-dessus est représentatif du mouvement vertical. La présentation des tableaux des modèles de calcul (feuilles 2 et 4) diffère également sensiblement selon le type de mouvement étudié.

- Pour les mouvements horizontaux, l'influence de l'intensité du vent entraîne le triplement des colonnes relatives aux intensités et puissances électriques (vent nul, moyen et maximal).
- Pour l'application benne, sur la feuille 4 de présentation nous retrouverons en plus des informations de puissances électriques et de courants pour chacun des treuils (suspension -fermeture), la globalisation de la puissance de freinage des deux mouvements dans le cas où les variateurs de suspension et de fermeture sont liés au niveau du bus continu.

23.1.4.5. Fonctionnement du moteur asynchrone en génératrice

Généralité

Le fonctionnement en génératrice se produit :

- soit lorsque la charge ou la machine entraînée fait tourner le moteur au-delà de la vitesse synchrone correspondant à la fréquence délivrée par le convertisseur (par exemple au cours de la phase de descente en charge pour un mouvement vertical de levage)
- soit lors du freinage du moteur

L'inversion du sens de transfert d'énergie, qui se produit lors du passage du mode de fonctionnement en moteur à celui en génératrice, est due à l'inversion du sens de circulation du courant dans le circuit intermédiaire du variateur. Le redresseur à diodes équipant les convertisseurs de fréquence ALTIVAR ne permettant pas une telle inversion, il est nécessaire d'associer au variateur de base :

- soit l'option freinage par résistance pulsée par hachage
- soit l'option récupération d'énergie sur le réseau

Avec l'option résistance pulsée par hachage, l'énergie restituée par la machine est dissipée par effet joule dans une résistance de freinage. Selon le type de variateur considéré, le hacheur est ou n'est pas intégré au produit de base.

Remarque:

Il est intéressant de remarquer que dans le cas du freinage par résistance pulsée, le fonctionnement en génératrice n'est pas tributaire du réseau d'alimentation. Les brèves coupures de la tension réseau n'influent pas sur le processus de freinage.

⇒ détermination des résistances de freinage à l'aide du logiciel de calcul

Le logiciel de calcul moteur permet de calculer dans le cas d'une motorisation par des machines asynchrones pilotées par des convertisseurs de fréquence, le dimensionnement des résistances à disposer sur le bus continu du ou des variateurs afin d'absorber l'énergie de freinage.
Nous distinguerons dans le tableau correspondant deux cas de figure repérées par des zones grisées différentes:

⇒ le dimensionnement dans le cas du variateur **ATV66** (jusque 220kW)
⇒ le dimensionnement dans le cas du variateur **ATV62** (au-de là de220 kW)

ATV66 **ATV62**

Cette distinction est indispensable, car les deux types de variateurs fonctionnent avec des tensions de bus continu différentes (**750V** pour le variateur **ATV66** et **630V** pour le variateur **ATV62**)

Le logiciel permet de définir pour chacun des cas:

- la puissance efficace sur cycle de la résistance
- la puissance crête qu'elle doit supporter les dans les phases transitoires de fonctionnement
- la valeur ohmique de cette résistance

Ces résultats de calcul figurent dans le tableau page 4 des modèles pour moteurs à courant alternatif.

RESISTANCES de FREINAGE	**Puissance/cycle en kW**	**274**	**274**
	Puissance crête en kW	**1 234**	**1 234**
	Valeur en Ohm	**0,46**	**0,32**

⇒ *calcul de la puissance efficace sur cycle*

Pour la détermination de la puissance efficace sur cycle, nous utiliserons la méthode de la somme des p carrés t afin d'obtenir la puissance thermique équivalente sur le cycle de durée T.
Par convention, nous appellerons :

$P_{th.Fr} = \sqrt{\Sigma p_{mi\ Fr}^2 . t_i / T}$ avec

$P_{th.Fr}$	puissance efficace sur cycle en watts (W)
$p_{mi\ Fr}$	puissance mécanique élémentaire de freinage
t_i	durée d'une étape élémentaire du cycle
T	durée totale du cycle

⇒ *calcul de la puissance crête*

Elle est obtenue en effectuant la recherche de la plus grande puissance mécanique négative au moyen du tableur. C'est cette valeur qui sera utilisée pour déterminer la valeur ohmique des résistances de freinage.
Par convention, nous l'appellerons $P_{max\ Fr}$

⇒ *calcul de la valeur ohmique de la résistance de freinage*

➲ cas **ALTIVAR 66**

La tension du bus continu du ou des variateurs est appliquée aux bornes de la résistance de freinage au moyen d'un dispositif hacheur *intégré* au variateur. Ce dispositif entre automatiquement en action lorsque la tension du bus continu dépasse un seuil prédéterminé pendant les périodes de fonctionnement en générateur du moteur d'entraînement.
Par convention, nous appellerons :

$U_{BUS\ max}$	la tension continue maximale du bus	en volts	**(V)**
$P_{max\ Fr}$	la puissance maximale à dissiper par la résistance de freinage	en kilowatts	**(kW)**
r	la valeur de la résistance de freinage	en Ohms	**(Ω)**

On obtient la valeur ohmique de la résistance de freinage en appliquant la relation suivante:

$$r = U_{BUS\ max}^2 / P_{max\ Fr} / 1000$$

soit encore pour le variateur ATV 66:

$$r = 750 . 750 / P_{max\ Fr} / 1000$$

➲ cas **ALTIVAR 62**

La tension du bus continu du ou des variateurs est appliquée aux bornes de la résistance de freinage au moyen d'un dispositif hacheur *externe* au variateur. Ce dispositif appelé module de freinage entre automatiquement en action lorsque la tension du bus continu dépasse un seuil prédéterminé pendant les périodes de fonctionnement en générateur du moteur d'entraînement.
Comme pour l'application précédente avec le variateur ATV 66 ,on obtient la valeur ohmique de la résistance de freinage en appliquant la relation suivante:

$$r = U_{BUS\ max}{}^2 / P_{max\ Fr} / 1000$$

soit encore pour le variateur ATV 62:

$$r = 630 . 630 / P_{max\ Fr} / 1000$$

Remarque 1:

Dans le cas de figure ATV 66, il est indispensable de vérifier au moyen du catalogue des produits concernés, que la valeur ohmique de la résistance de freinage ne soit pas inférieure à la valeur minimale préconisée.
Si ce n'est pas le cas, cela signifie que l'énergie de freinage est trop importante, et que le temps doit impérativement être augmenté.

Remarque 2:

Dans le cas de figure ATV 62, le module de freinage externe associé est caractérisé par deux paramètres fondamentaux:

⇒ la puissance crête unitaire de freinage (**90 kW**)

⇒ la puissance thermique sur cycle (**22 kW**)

En conséquence, il sera donc indispensable de disposer autant de dispositifs modules et résistances de freinage de telle manière que les conditions ci-dessous soient toujours remplies:

➲ $(P_{max\ Fr} / 90) + 1 = N_{bre\ mod.}$
et
➲ $(P_{th.Fr} / 22) + 1 = N_{bre\ mod.}$

⇒ option récupération sur le réseau

Le dispositif de freinage par résistance pulsée peut être remplacé par un système de récupération de l'énergie sur le réseau. Ce dispositif de technologie modulaire comporte un étage de puissance triphasé à transistors IGBT dont la structure interne est semblable à celle d'un onduleur dont on aurait inversé les connexions. Comme pour le système de freinage sur résistance, ce dispositif, n'est actionné que lorsque la tension du bus continu dépasse un seuil prédéfini. Au delà de cette valeur, le dispositif permet de contrôler le courant réinjecté vers le réseau de telle sorte que le facteur de puissance reste voisin de 1.
Cette technique, plus complexe que celle utilisée dans le cas de freinage par dissipation d'énergie à travers des résistances et dont l'efficacité dépend de la présence du réseau, sera d'autant plus intéressante à considérer que la puissance de récupération sera élevée et que la durée de fonctionnement en freinage sera grande dans le cycle.
Il existe plusieurs modèles de cette option caractérisés par:

➲ *la tension d'entrée*
➲ *le courant thermique*
➲ *le courant crête maximum*

Le calibre le plus puissant de la gamme permet de contrôler une intensité de récupération issue du bus continu de **236A** (soit 135 kW) pour une intensité thermique équivalente sur cycle de **66A** (soit 38 kW).
Si l'application impose de récupérer une puissance supérieure, il est possible comme pour les modules de freinage autonomes de les associer en parallèle. Ceci permet alors de multiplier les capacités de récupération de l'installation par le nombre de modules associés de cette façon.

⇒ interconnexion des variateurs par le **bus continu**

Cette méthode consiste à raccorder en parallèle les sorties **+** et **-** de plusieurs variateurs.
Dans ce cas les convertisseurs de fréquence restent **autonomes** et peuvent être mis hors circuit indépendamment les uns des autres.

L'intérêt principal de cette technique et de **réduire la quantité** et le **dimensionnement en puissance** des résistances de freinage d'une machine lorsque les différents mouvements ne sont pas en même temps en phase de ralentissement (optimisation du dispositif de freinage).
L'énergie de freinage du mouvement est alors renvoyée par l'intermédiaire du bus continu commun vers les variateurs des mouvements fonctionnant en moteur.
Il est possible de mettre en parallèle des variateurs de puissances différentes (**2,2 à 500 kW**)
Dans le cas de figure où l'on associe des variateurs **ATV 66** et **ATV 62** , c'est la tension de bus la plus basse qui est à considérer soit **630V** .

Ce type de montage nécessite néanmoins un certain nombre de *précautions* à la mise en oeuvre:

➲ *équilibrage des courants d'entrée des ponts redresseurs*

Tous les variateurs doivent être connectés au **même réseau d'alimentation**.
La **mise sous tension** des différents variateurs doit être **simultanée**, et utiliser si possible le même organe de commande puissance.
L'**équilibrage** des courants d'entrée des ponts de diodes nécessite l'emploi obligatoire des inductances de ligne cataloguées.

Remarque:

La connexion des variateurs sur le bus continu ne nécessite pas d'inductance de couplage.

➲ *protection contre les courts-circuits*

Cette protection est indispensable pour éviter qu'un défaut interne à l'un des variateurs ne puisse provoquer la destruction d'un ou de plusieurs autres variateurs. Il faut donc installer entre chaque variateur et le bus d'interconnexion continu un organe de coupure (fusible ultra-rapide ou disjoncteur). Vu la nature du courant à interrompre (tension élevée, courant continu), la solution fusible semble être la solution à retenir dans la majorité des cas, la plupart des disjoncteurs ne convenant pas à l'application.
La note VVD du 20 avril 95 (ref: BUSDC-66.DOC) précise les références des fusibles à associer aux différents calibres des variateurs.

➲ *marche dégradée*

Si plusieurs variateurs de puissances différentes sont interconnectés par leurs bus continus et qu'un variateur de forte puissance se trouve déconnecté de son alimentation alternative L1, L2, L3, il peut alors être alimenté par le pont de diodes d'un variateur de puissance inférieure. Il y a dans ce cas un risque de destruction du pont de diodes d'alimentation du variateur le plus petit.
Pour éviter ce type d'incident la séquence de validation de chaque variateur doit prendre en compte la présence ou non individuelle du réseau (défaut "phase réseau" activé).