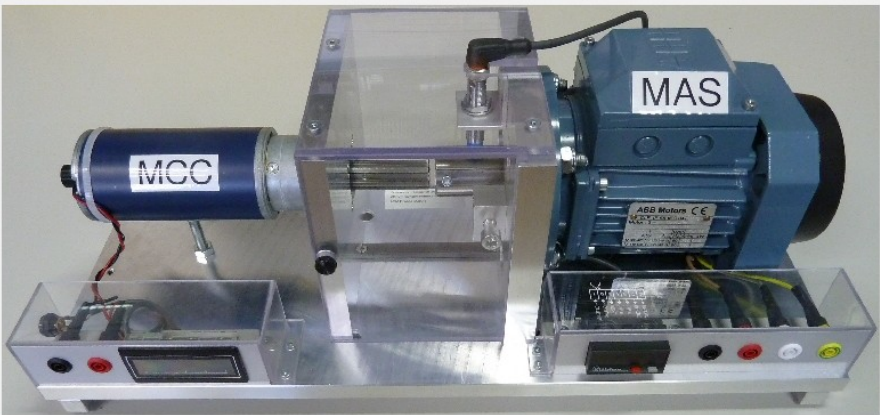


La Machine Asynchrone

En tant que moteur, la machine asynchrone est à ce jour la plus répandue sur terre de part sa construction robuste et sa facilité d'utilisation.

Le but de ce TP est de passer en revue les essais usuels de la machine asynchrone (permettant de vérifier les données contractuelles), de dessiner la caractéristique de couple, d'effectuer des essais en charge, des essais de démarrage, ...



A Savoir

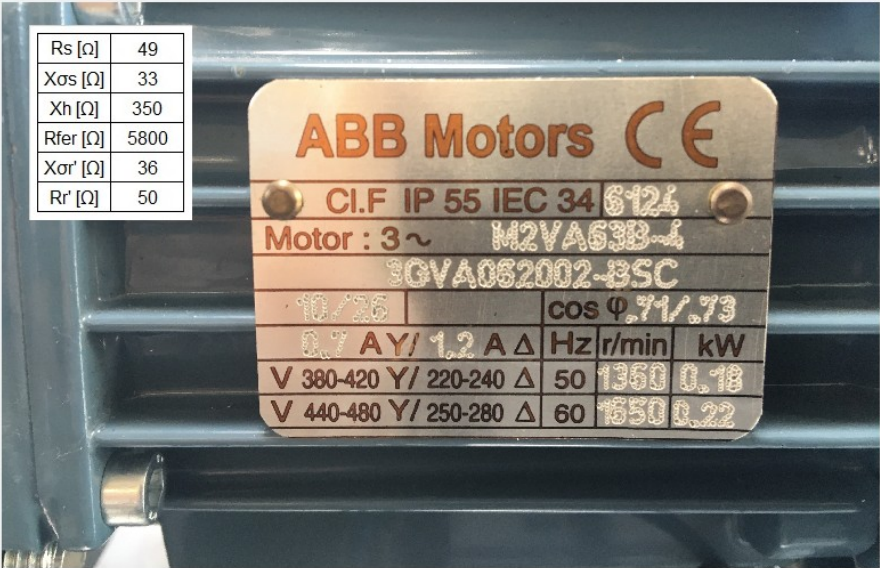
Une case blanche doit être remplie par vous

Une case jaune est le résultat d'un calcul

Table N° : 1

Une case verte est la copie d'une case remplie ou calculée précédemment

Rs [Ω]	49
Xs [Ω]	33
Xh [Ω]	350
Rfer [Ω]	5800
Xor' [Ω]	36
Rr' [Ω]	50



TPLaime - v3.17.2 (085)

Equations des puissances

Les variables possibles sont : Uph, Iph, cos_phi, sin_phi

Puissance Apparente

S = 3*Uph*Iph

Puissance Active

P = 3*Uph*Iph*cos_phi

Puissance Réactive

Q = 3*Uph*Iph*sin_phi

Relations tensions/courants

Dans les calculs nous utilisons Uph et Iph, mais en pratique nous ne pouvons mesurer que Uligne et Iligne.

Quelles relations lient Uligne/Uph et Iligne/Iph en fonction du couplage (étoile ou triangle) ?

Les fonctions possibles sont : sqrt()

Les variables possibles sont : Uligne, Iligne

Montage en Etoile

Uph = Uligne/sqrt(3)

Iph = Iligne

Montage en Triangle

Uph = Uligne

Iph = Iligne/sqrt(3)

Equations déductibles de mesures

Sachant que nous pouvons mesurer

Uligne, Iligne et P (la puissance active)

le couplage étant connu, nous pouvons écrire :

Les fonctions possibles sont : sin(), cos(), tg(), arcsin(), arccos(), arctg()

Les variables possibles sont :

Uph, Iph, P, cos_phi, sin_phi, Z

Uph = Uligne/sqrt(3)

Iph = Iligne

Puissance Apparente

S = 3*Uph*Iph

Le cos phi

cos_phi = P/(3*Uph*Iph)

Le sin phi

sin_phi = sin(arccos(cos_phi))

Puissance Réactive

Q = 3*Uph*Iph*sin_phi

La norme de l'impédance Z

|Z| = Uph/Iph

La partie Réelle de Z

Re(Z) = |Z|*cos_phi

La partie Imaginaire de Z

Im(Z) = |Z|*sin_phi

Plaque signalétique

Uphase nominal
230 [V]

Iphase nominal
0.7 [A]

Résistance de phase
Mesure ohmique de la résistance

Rs donné dans le datasheet
49 [Ohm]

Rs mesuré avec un ohmmètre
51 [Ohm]

Erreur en % (doit être < 7%)
4.1

Dans la machine asynchrone Uph est appelé Us et Iph est appelé Is s = stator Attention : Le wattmètre, grâce au montage en neutre artificiel, vous affiche directement la tension de phase (Us).

plus petites valeurs de la plaque signalétique (moyenne)



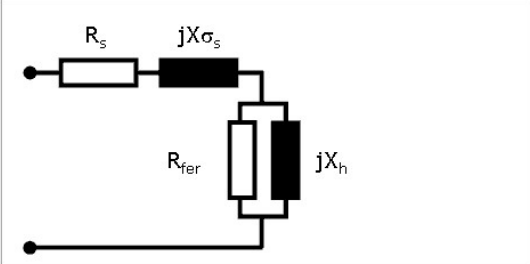


Schéma équivalent

☐ Schéma 1

☒ Schéma 2

☐ Schéma 3

Le but ici est de réussir à déterminer Rfer et Xh à partir du schéma équivalent à vide. Pour cela il faut d'abord exprimer l'impédance à vide (l'indice '0' signifie à vide) en fonction des paramètres du schéma équivalent : Rs, Xss, Rfer, Xh, Rrp, Xsrp

j (partie imaginaire complexe)

Impédance statorique Zs

Zs = Rs+j*Xss

Impédance Zh de la branche magnétisante

Zh = j*Rfer*Xh/(Rfer+j*Xh)

Impédance Z0 (en fonction de Zs et Zh)

Z0 = Zs+Zh

De là, en écrivant :

$$\frac{1}{Z_0 - Z_s} = \frac{1}{Z_h} = \frac{1}{R_{fer}} + \frac{1}{jX_h}$$

nous pouvons tirer Rfer et Xh

$$R_{fer} = \frac{(R_0 - R_s)^2 + (X_0 - X_{ss})^2}{(R_0 - R_s)}$$
$$X_h = \frac{(R_0 - R_s)^2 + (X_0 - X_{ss})^2}{(X_0 - X_{ss})}$$

Pour déterminer Rfer et Xh, il faut connaître Rs et Xss.

Rs a été mesuré à l'Ohmmètre : Rs = 51 [Ohm]

Plusieurs solutions existent pour "trouver" ou calculer Xss, dans notre cas, nous ferons l'approximation que Xss vaut environ 10% de l'impédance nominale Zn.

D'après les valeurs que vous avez rentrées sous "équations de base", que vaut Xss ?

Xss = 33 [Ohm]

Ne pas oublier le nombre de phases. P0 c'est la puissance totale elec, on enleve Pfv (ventilation) car liées au rotor, ici on veut le stator.

Détermination de R0 et X0 à partir des mesures

Les variables possibles sont :

Us0, Is0, cos_phi0, sin_phi0, Rs, Xss, Xh, Rfer
P0, Pfv, Pfer, Pjs
j (partie imaginaire complexe)

Pertes joules stator

Pjs = 3*Rs*Is0^2

Cos phi à vide - Tenir compte de Pfv !

cos_phi0 = (P0-Pfv)/(3*Us0*Is0)

Sin phi à vide

sin_phi0 = sin(arccos(cos_phi0))

Norme de l'impédance équivalente à vide

|Z0| = Us0/Is0

Partie Réelle de Z0

R0 = |Z0|*cos_phi0

Partie Imaginaire de Z0

X0 = |Z0|*sin_phi0

Mesures de l'essai à vide

!!! SECURITE !!!
Ne restez pas longtemps à 1.1 Un!

Mesurer U0, I0, P0 avec le wattmètre.

Le glissement noté "s", appelé slip en anglais doit aussi être mesuré/déterminé.

Les variables possibles :
omega_s, omega_m, omega_r, pi.

s = (omega_s-omega_m)/omega_s [-]

	Us0	Is0	P0	Slip	Pjs	Z0	Rfer	Xh
	[V]	[A]	[W]	[%]	[W]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]
1.1 Un	255	0.76	128	1.5	88.4	336	3810	296
1.0 Un	230	0.6	84	1.3	55.1	383	4404	344
0.9 Un	207	0.48	58	1.3	35.3	431	4654	393
0.8 Un	184	0.41	44.3	1.3	25.7	449	4535	410
0.7 Un	162	0.35	33.2	1.3	18.7	463	4544	425
0.6 Un	138	0.28	24.1	1.3	12.0	493	3970	455
0.5 Un	115	0.23	18.2	1.3	8.1	500	3296	463
0.4 Un	92	0.18	13.4	1.3	5.0	511	2514	476
0.3 Un	69	0.14	10.3	2.5	3.0	493	1597	464

À partir de ces mesures tirez les valeurs de Rfer et Xh

Rfer = 4404 [Ohm]

Xh = 344 [Ohm]

nominales

s mag stator (elec/p)
a meca rotor

r=s-m elec induite rotor

Us=Uligne
Us0=Uph

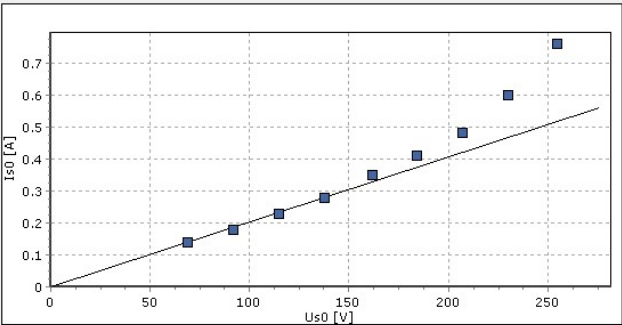
omega_s=2*pi*f/p=3000#rpm/p=1500
(p=2) car datasheet 1360rpm - a déduire --
omega_r=mesure

on prend les valeurs nominales pour Rfer, Xh

Détermination de Pfv et Pfer

L'essai à vide est important car il nous permet de tracer le graphique ci-contre. Non seulement cet essai est nécessaire pour la détermination des paramètres du schéma équivalent mais il donne des informations importantes pour la détermination de la caractéristique en charge, à savoir, les pertes frottement-ventilation (Pfv) et les pertes fer (Pfer). Que valent donc ces pertes à Un et Un/2 ? Erreur Max = 7%

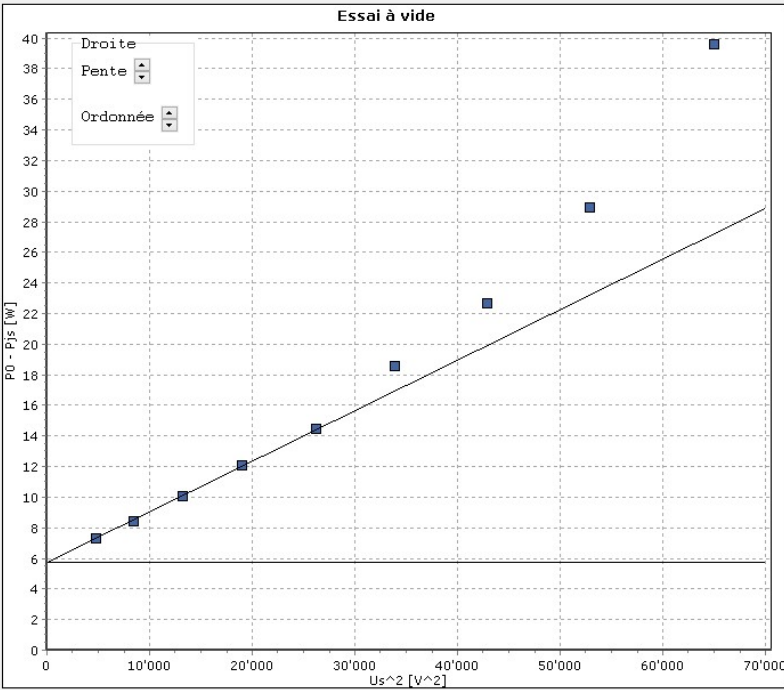
Un Pfv+v = 5.75 [W] Un/2 Pfv+v = 5.75 [W]
Un Pfer = 23.25 [W] Un/2 Pfer = 4.25 [W]



Pfv (frottements, ventil) ordonnée à l'origine, existe même quand moteur pas alimenté

Pfer = P0 - Pfs - Pfv

La courbe est quadratique, on linearise les quelques premiers points alignés, bonne estimation de l'ordonnée à l'origine



L'indice 'cc' signifie en court-circuit. On l'appelle souvent ainsi car le schéma équivalent correspond à celui d'un transformateur en court-circuit.

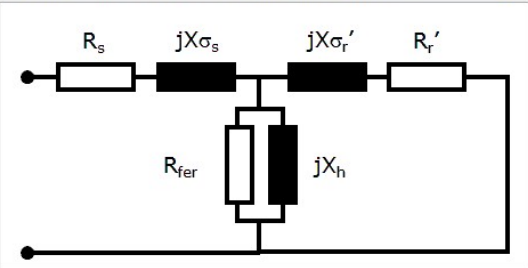


Schéma
☐ Schéma 1 ☐ Schéma 2 ☒ Schéma 3

Il faut d'abord écrire l'impédance de court-circuit en fonction des paramètres du schéma équivalent : Rs, Xss, Rfer, Xh, Rrp, Xsrp, j (partie imaginaire complexe)

Zr'cc = Rrp + j * Xsrp

Impédance statorique Zs

Zs = Rs + j * Xss

Impédance Zh de la branche magnétisante

Zh = j * Rfer * Xh / (Rfer + j * Xh)

Impédance de CC (en fonction de Zs, Zh, Zr'cc)

Zcc = Zs + (Zh * Zr'cc) / (Zh + Zr'cc)

Impédance Zr' (à partir de l'équation précédente)

Zr'cc = 1 / ((1 / (Zcc - Zs)) - (1 / Zh))

De là, nous pouvons écrire :

Rr' = Re { 1 / (1 / (Zcc - Zs) - 1 / Zh) }

Xsr' = Im { 1 / (1 / (Zcc - Zs) - 1 / Zh) }

Détermination de Rcc et Xcc à partir des mesures

Les variables possibles sont : Uscc, Iscc, cos_phicc, sin_phicc, Rs, Xss, Xh, Rfer, Pcc, Pfv, Pfer, Pfs, j (partie imaginaire complexe)

Cos phi en court-circuit

cos_phicc = Pcc / (3 * Uscc * Iscc)

Sin phi en court-circuit

sin_phicc = sqrt(1 - cos_phicc * cos_phicc)

Norme Impédance équivalente en CC

|Zcc| = Uscc / Iscc

Rcc = |Zcc| * cos_phicc

Xcc = |Zcc| * sin_phicc

De là, pour déterminer Rr' et Xsr', il faut connaître Rs et Xss (ils ont été déterminés avant l'essai à vide).

Rs = 51 [Ohm] Xss = 33 [Ohm]

Attention à monter la tension lentement et à ne pas rester longtemps au-delà du courant nominal. La machine ne tournant pas, elle n'est pas refroidie!

	Iscc	Uscc	Pcc	Rrp	Xsrp
	[A]	[V]	[W]	[Ohm]	[Ohm]
1.1 In	0.77	87	156	45.9	38.3
1.0 In	0.7	81	138	52.4	32.1
0.9 In	0.63	74	113	54.2	33.6
0.8 In	0.56	66	90	55.0	32.9
0.7 In	0.49	58	69	55.3	33.7
0.6 In	0.42	50	52	57.5	30.1
0.5 In	0.35	41	35	54.2	32.3
0.4 In	0.28	33	22	53.3	37.1
0.3 In	0.21	25	13	57.5	30.1

A partir de ces mesures tirez les valeurs de Rr' et Xsr'

Rr' = 52.4 [Ohm]

Xsr' = 32.1 [Ohm]

Commentaires personnels sur l'essai à rotor bloqué :

* Evolution de Rrp et Xsr' en fonction de la tension/courant ?

* ...

Les valeurs restent relativement stables

On prend les valeurs nominales car c'est celles qu'on utilise

Schéma équivalent complet de la machine asynchrone

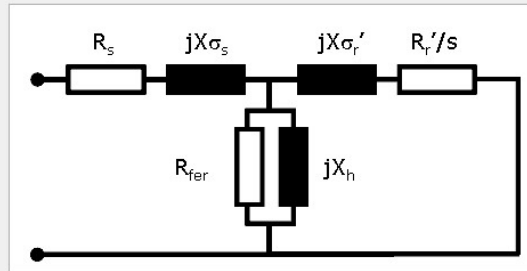


Schéma
☒ Schéma 1
☐ Schéma 2
☐ Schéma 3

Rs constructeur	Rs mesuré	Ecart Rs [%]
49	51	4.1
Xss constructeur	Xss Calculé	Ecart Xss [%]
33	33	0.0

Avec l'essai à vide -----

Rfer constructeur	Rfer mesuré	Ecart Rfer [%]
5800	4404	24.1
Xh constructeur	Xh mesuré	Ecart Xh [%]
350	344	1.7

Avec l'essai à rotor bloqué (en court-circuit) -----

Xsr' constructeur	Xsr' mesuré	Ecart Xsr' [%]
36	32.1	10.8
Rr' constructeur	Rr' mesuré	Ecart Rr' [%]
50	52.4	4.8

Impédance équivalente

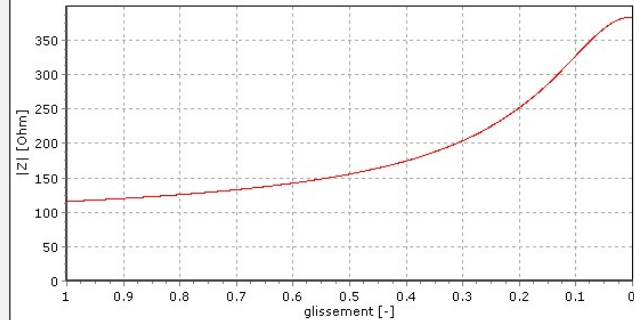
Les variables possibles sont les paramètres de la machine:
 Rs, Xss, Xh, Rfer, Xsrp, Rrp, j (partie imaginaire complexe), s (le glissement)
 Zh et Zs ont déjà été déterminés dans l'essai à vide.

$$Z_s = R_s + j \cdot X_{ss} \quad Z_r' = R_{rp}/s + j \cdot X_{srp}$$

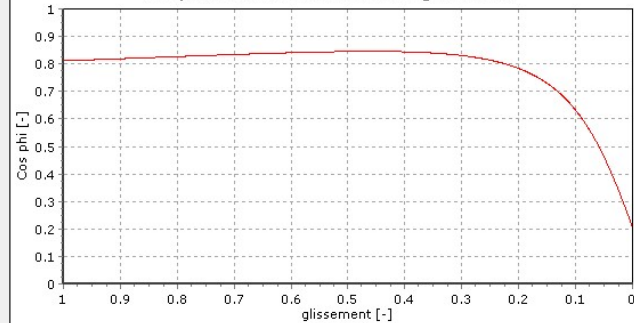
En fonction de Zs, Zh et Zrp

$$Z_h = j \cdot R_{fer} \cdot X_h / (R_{fer} + j \cdot X_h) \quad Z_{eq} = Z_s + (Z_h \cdot Z_{rp}) / (Z_h + Z_{rp})$$

Norme de l'impédance du moteur en fonction du glissement



Cos phi du moteur en fonction du glissement



Pour déterminer la caractéristique de couple théorique d'une machine asynchrone, il suffit d'égaliser les deux équations de puissance mécanique écrites d'un côté avec des variables mécaniques et de l'autre côté avec des variables électriques.

Ensuite, par le théorème de Thévenin, il est possible de dessiner la courbe de couple.

Quel terme représente la puissance mécanique ?

- ☐ $3 \cdot R_s \cdot I_s^2$
☐ $R_s \cdot I_r'^2$
☐ $3 \cdot (R_r' / s) \cdot I_s^2$
☐ $(R_r' / s) \cdot I_r'^2$
☐ $(R_r' (1-s)/s) \cdot I_r'^2$ **(Correct)**
☐ $3 \cdot (R_r' (1-s)/s) \cdot I_r'^2$ **(Correct)**
☐ $(R_r' (1-s)/s) \cdot I_s^2$
☐ $3 \cdot (R_r' (1-s)/s) \cdot I_s^2$

Valeur du couple nominal

Puissance nominale		Couple nominal
Fn = 180 [W]	Tn = 1.26 [Nm]	
Vitesse nominale		
Nn = 1360 [tr/min]		

Equation de puissance mécanique

Les variables possibles sont :

Tm = couple mécanique [Nm]
 Omegam = vitesse angulaire mécanique [rad/s]
 ns = vitesse du champ tournant [tr/s]
 s = le glissement

Puissance Mécanique

$$P_{mec} = T_m \cdot \Omega_{mec}$$

Pulsation mécanique en rad/s

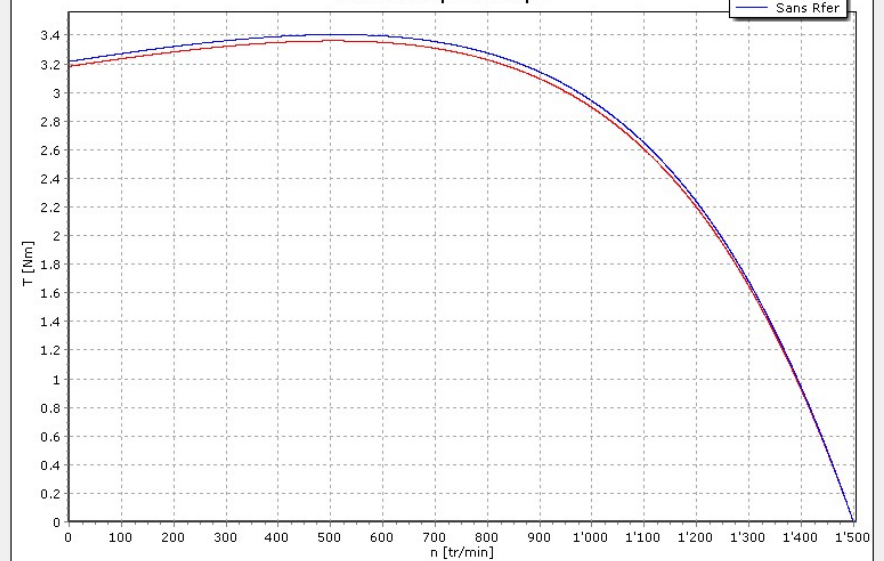
$$\Omega_{mec} = 2 \cdot \pi \cdot n_s \cdot (1-s)$$

$$\Rightarrow T_m = \frac{3}{2 \cdot \pi \cdot n_s} \frac{R_r'}{s} I_r'^2$$

En déterminant Ir' par le théorème de Thévenin, nous pouvons écrire Tm :

$$T_m = \frac{3 U_e^2 (R_r'/s)}{(2 \cdot \pi \cdot n_s) ((R_e + R_r'/s)^2 + (X_e + X_{sr}')^2)}$$

Caractéristique de couple



En mesurant U_s , I_s et P_{el} avec le wattmètre, ainsi que la vitesse du moteur, déterminer toutes les pertes, le couple et le rendement.

Vous pouvez copier les cellules depuis Excel. Pour cela, la cellule de référence doit être sélectionnée (avec un petit trait tillé) mais pas en cours d'édition

U_s	I_s	P_{el}	$\cos\phi$	n	s	P_{js}	P_{jr}	P_{fer}	P_{f+v}	Putile	Couple	Rend.
[V]	[A]	[W]	[-]	[tr/min]	[%]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[Nm]	[%]
230.00	0.64	269.00	0.61	1384.00	7.73	62.67	14.16	23.25	5.75	163.17	1.13	60.66
230.00	0.62	237.00	0.55	1405.00	6.33	58.81	9.81	23.25	5.75	139.37	0.95	58.81
230.00	0.61	219.00	0.52	1417.00	5.53	56.93	7.68	23.25	5.75	125.39	0.84	57.25
230.00	0.60	198.00	0.48	1428.00	4.80	55.08	5.74	23.25	5.75	108.18	0.72	54.63
230.00	0.59	181.00	0.44	1439.00	4.07	53.26	4.25	23.25	5.75	94.49	0.63	52.21
230.00	0.59	163.00	0.40	1449.00	3.40	53.26	2.94	23.25	5.75	77.80	0.51	47.73
230.00	0.59	154.00	0.38	1454.00	3.07	53.26	2.38	23.25	5.75	69.36	0.46	45.04
230.00	0.59	145.00	0.36	1459.00	2.73	53.26	1.87	23.25	5.75	60.87	0.40	41.98
230.00	0.59	128.00	0.31	1469.00	2.07	53.26	1.06	23.25	5.75	44.68	0.29	34.90
230.00	0.59	128.00	0.31	1469.00	2.07	53.26	1.06	23.25	5.75	44.68	0.29	34.90

Courant Max MCC

Pour charger la machine asynchrone nous utilisons une machine à courant continu

Il ne faut pas dépasser le courant max de la machine à courant continu (ou alors pendant un temps très court)

Que vaut le courant max de la machine à courant continu ?

Courant Max MCC

4.9 [A]

mesure - U_s , I_s , P_{el} , n

$\cos\phi = P_{el} / (3 \cdot U_s \cdot I_s)$

$s = (\Omega_{s,n} - n) / \Omega_{s,n}$, attention aux unités, $\Omega_{s,n} = (50\text{Hz} \cdot 60 = 3000\text{rpm}) / (\text{nb paires de poles} = 2)$

$P_{js} = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2$ ($R_s = 51\text{ohm}$)

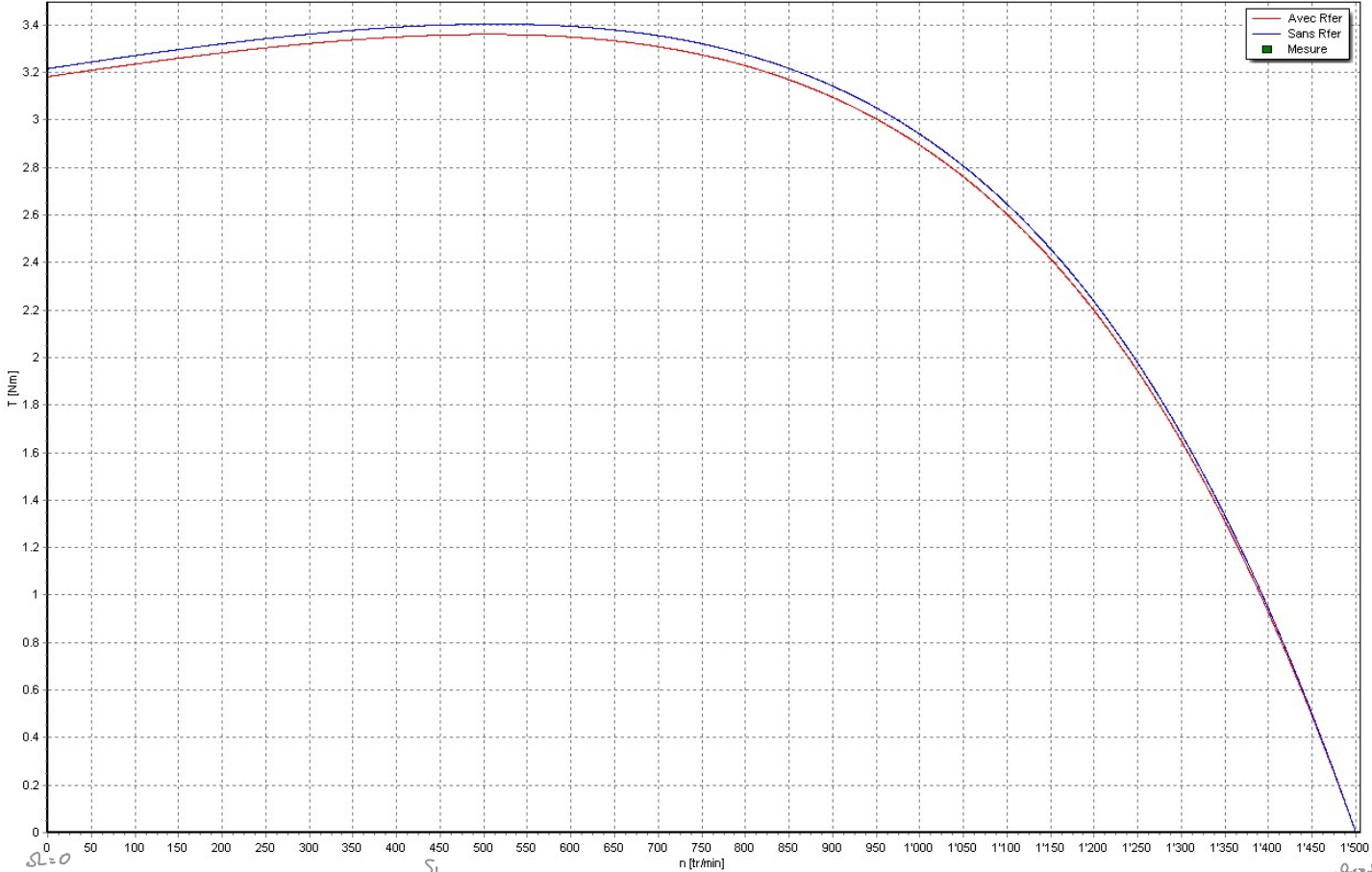
$P_{jr} = s \cdot P_{entrefer} = s \cdot (P_{el} - P_{js} - P_{fer})$ (P_{fer} et P_{fv} sont constants, fonction de U_s , cf. essai à vide)

Putile = $P_{el} - P_{js} - P_{jr} - P_{fer} - P_{fv}$

Couple = P_{mec} / n ($P_{mec} = P_{utile} + P_{fv}$)

Rendement = Putile/ P_{el}

Caractéristique de couple



Norme de Z_{eq} au démarrage

116

Courant de démarrage

RMS à U_n	Crête à U_n
1.98	2.80
RMS à $U_n/2$	Crête à $U_n/2$
0.99	1.40

Courant de démarrage Mesuré

RMS à U_n	Crête à U_n
2.12	3
RMS à $U_n/2$	Crête à $U_n/2$
1.03	1.45

Sachant qu'à l'instant du démarrage le glissement s vaut 1, il est relativement aisé de calculer le courant de démarrage théorique en fonction du schéma équivalent.

Déterminer donc $|Z_{eq}|$ lors du démarrage.

CONSEIL : Ne faites pas le calcul analytique (c'est long), mais numérique ! Même google permet de le faire pour info

Ensuite, connaissant U_{ph} (U_n et $U_n/2$) nous déterminons I_{ph} à l'instant du démarrage grâce à la loi d'Ohm.

Ce courant est en général de 3.5 à 5 fois le courant nominal.

Commentaires personnels sur l'essai de démarrage

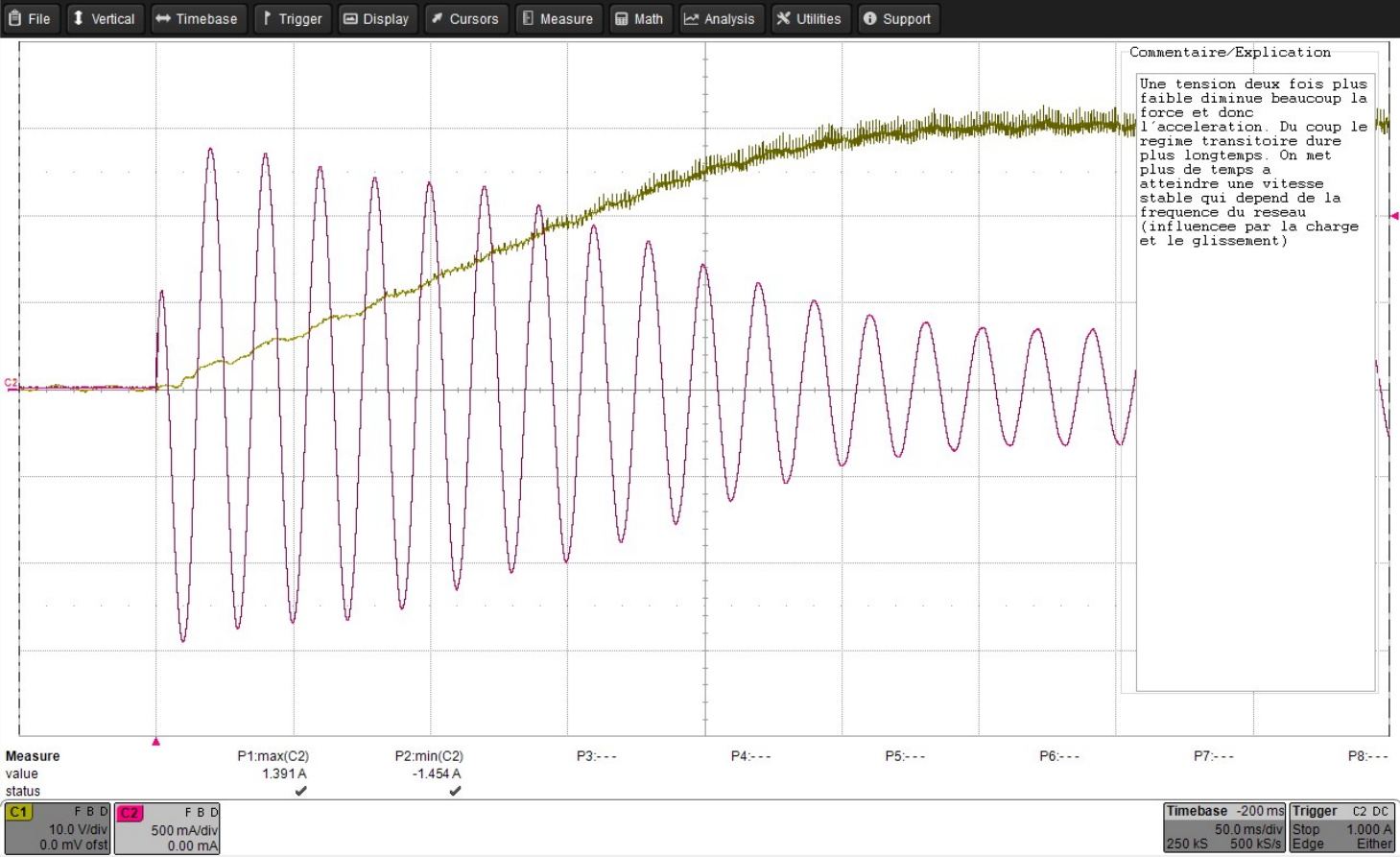
- * Valeurs, allures ?
- * Pourquoi un courant de 3.5 à 5 fois plus grand ?
- * ...

$$I_{ph} = U_{ph} / Z_{eq} \text{ (} Z_{eq} \text{ cf. essai en charge)}$$

Mesurer I et n (la vitesse). N'oubliez pas les auto-zéros et autres Degauss. Mettre un filtre de 2 bits sur le courant et de 3 bits sur la vitesse. Utiliser le mode "mesure" de l'oscillo pour directement afficher la valeur du pic de courant. Mettez max et min pour vraiment mesurer le pic.

Courant de crête max au démarrage à $U_n/2$

1.45 [A]



Mesurer I et n (la vitesse). N'oubliez pas les auto-zéros et autres Degauss. Mettre un filtre de 2 bits sur le courant et de 3 bits sur la vitesse. Utiliser le mode "mesure" de l'oscillo pour directement afficher la valeur du pic de courant. Mettez max et min pour vraiment mesurer le pic.

Courant de crête max au démarrage à Un
3 [A]

