

Compte-rendu TP n°2 et n°3 Machine Synchrone

1. Préparation

1.1 Contexte d'utilisation des machines synchrones

Les pertes dans une machine synchrone

- à rotor bobiné: pertes Joules du stator et du rotor (on néglige souvent les pertes magnétiques ainsi que les pertes mécaniques)
- à aimant permanent: pertes Joules du stator

La machine synchrone à aimants permanents est pertinente dans les applications où la compacité est le critère principal, par exemple l'éolien.

1.2 Signaux sinusoïdaux

On s'intéresse aux deux signaux sinusoïdaux $x_1(t)$ et $x_2(t)$ relevés à l'oscilloscope.

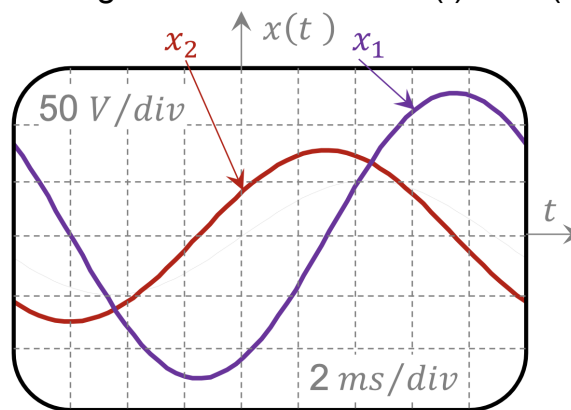


Figure 1: Allures des deux signaux relevés à l'oscilloscope

On trouve que la période des signaux est environ égale à 18 ms. Cela nous donne la fréquence $f = 1/T = 55.6$ Hz. Le signal $x_1(t)$ étant en retard de 3 ms, le signal $x_2(t)$ étant en avance d'environ 1.6 ms, on trouve :

$$x_1(t) \approx 125 \sin(\omega t - 3 \cdot 10^{-3} \cdot 2\pi f) = 125 \sin(\omega t - 1.0472)$$

$$x_2(t) \approx 75 \sin(\omega t + 1.6 \cdot 10^{-3} \cdot 2\pi f) = 75 \sin(\omega t + 0.5585)$$

On vérifie les expressions avec MATLAB et on trouve les mêmes allures:

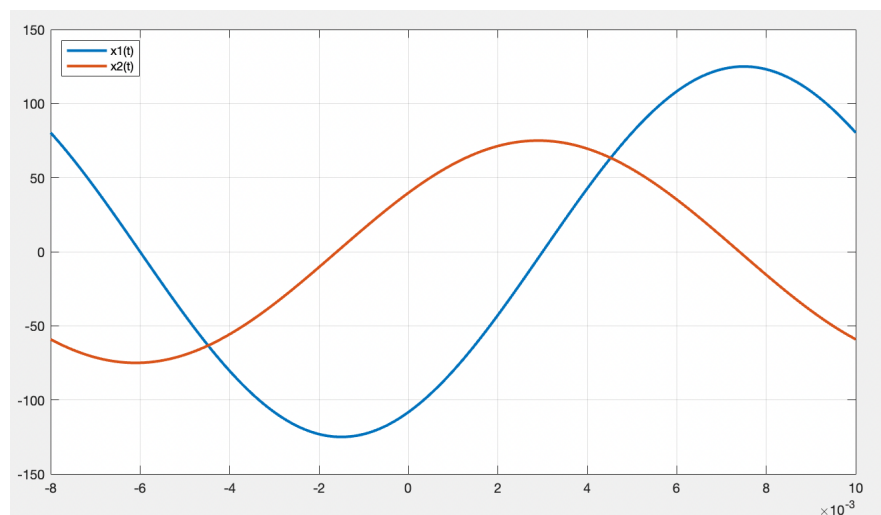


Figure 2: Vérification des expressions des signaux sur MATLAB

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

Les trois grandeurs caractéristiques sont donc:

A : Amplitude (dans l'unité de la grandeur mesurée)

ω : Pulsation (rad/s)

φ : Phase à l'origine (rad)

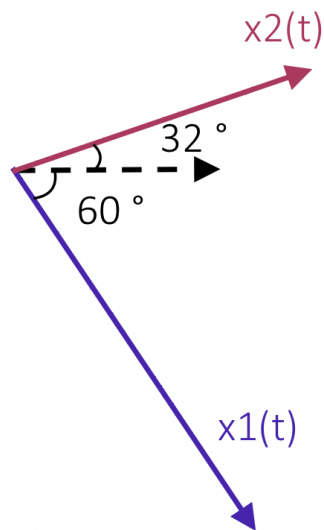


Figure 3: Diagramme de Fresnel des deux signaux

2. Simulation MATLAB

2.1 Identification des paramètres de la machine synchrone

2.1.1 Le schéma monophasé équivalent (circuit magnétique linéaire)

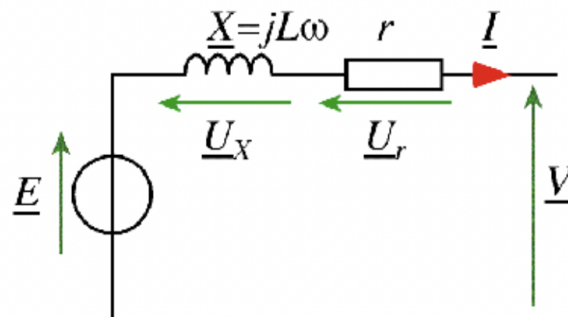


Figure 4: Schéma électrique équivalent d'une MS

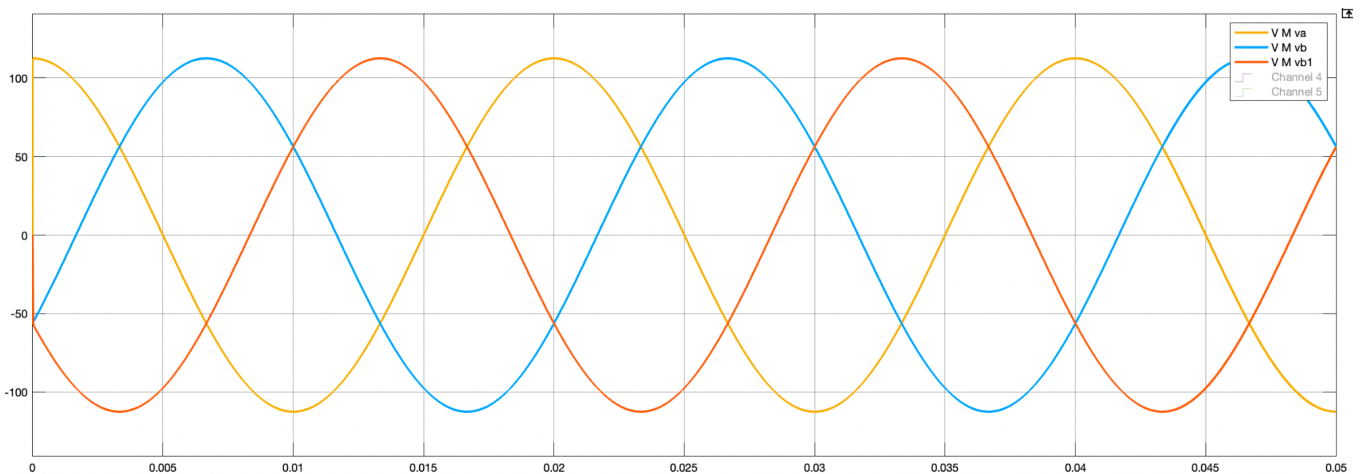
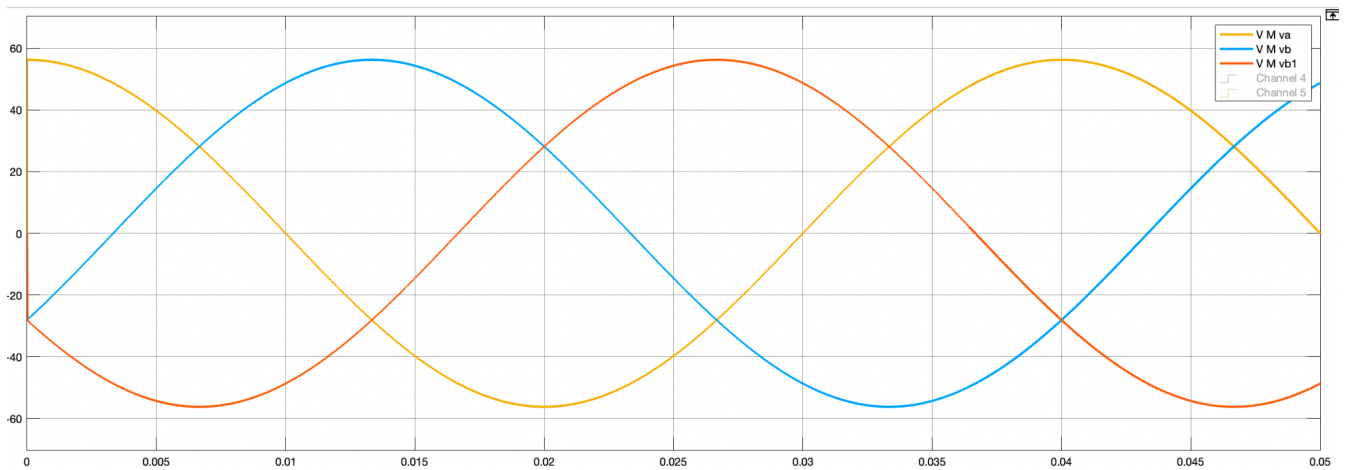
2.1.2 Les paramètres à identifier:

La résistance des trois phases du stator R_s , l'inductance cyclique rotorique L_s , la force électromotrice E .

2.1.3 On fait tourner la machine à vide

On impose les résistances de très grandes valeurs donc les courants statoriques sont négligeables. Cela est équivalent à un circuit ouvert donc correspond à l'essai à vide.

a) La tension aux bornes de la machine

Figure 5: Essai à vide, $N_r = 3000$ tr/min, $V_{eff} = 79.55$ V, $f = 50$ HzFigure 6: Essai à vide, $N_r = 6000$ tr/min, $V_{eff} = 159.1$ V, $f = 100$ Hz

Conclusion: On constate que la force électromotrice est proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor, la fréquence l'est aussi. Quand la vitesse de rotation augmente, la force électromotrice E générée augmente aussi.

b) Caractéristique

On peut donc déduire de cette expérience que la force électromotrice est proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor. Étant donné qu'il s'agit d'un essai à vide, on a donc $\underline{V} = \underline{E}$

$E = K \Omega$, on trouve que $K = 0.253$ V*s/m

c) Observation de la tension V_a au passage par 0 de l'angle θ_r

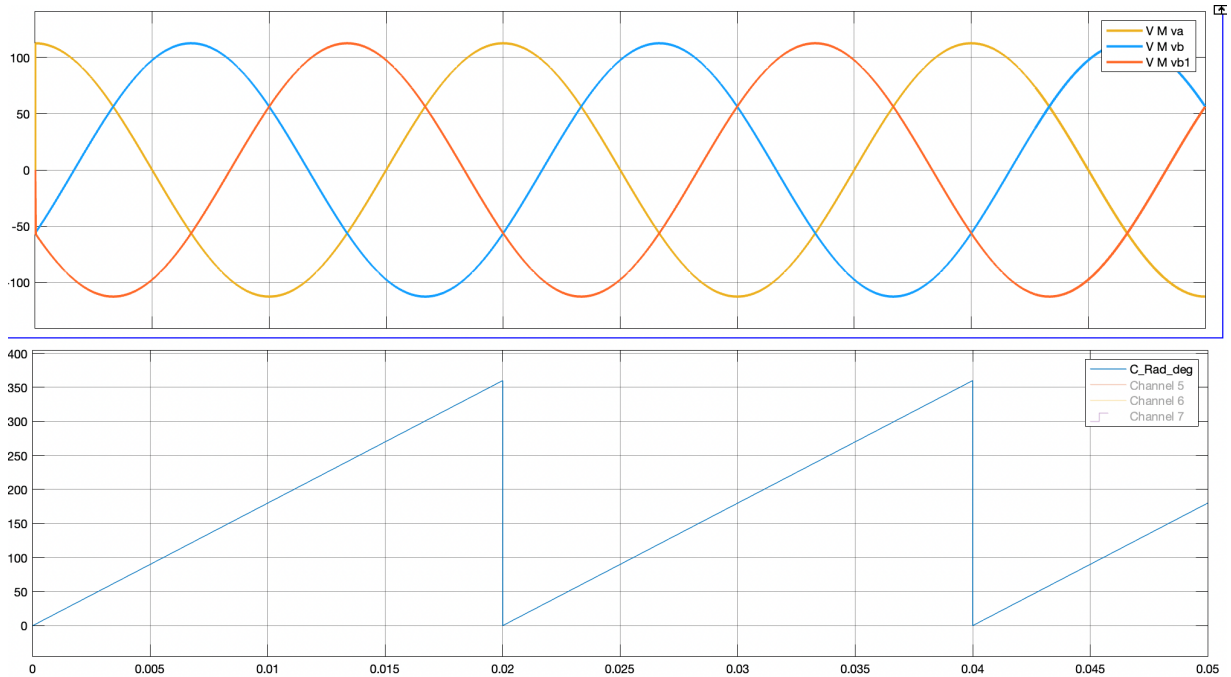


Figure 7: Va de la phase a au passage par 0 de l'angle θ_r

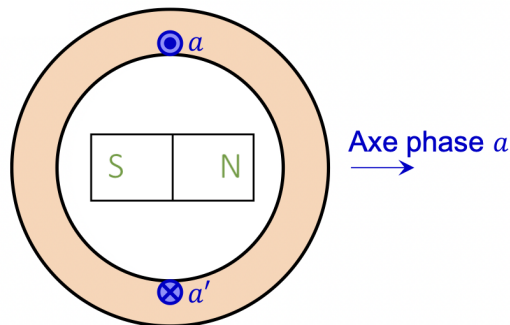


Figure 8: La position du rotor lors que le flux est maximum

Naturellement, quand le rotor passe à l'angle d'origine par rapport à l'axe a , le flux est maximum. La tension statorique de la phase a est $V_a = -\frac{d\Phi}{dt}$, ce qui nous donne normalement une tension nulle. Or on remarque que la tension V_a est maximum au passage par 0 de l'angle θ_r . Cela correspond à un décalage de $\pi/2$ de l'axe A , ou la position du capteur de position. On clique sur la machine synchrone sous Simulink et on trouve dans la section paramètre 'Rotor flux position when theta = 0: 90 degrees behind phase A axis (modified Park)'. Cela confirme notre hypothèse.

2.1.4 On alimente la machine par une source continue de 1V

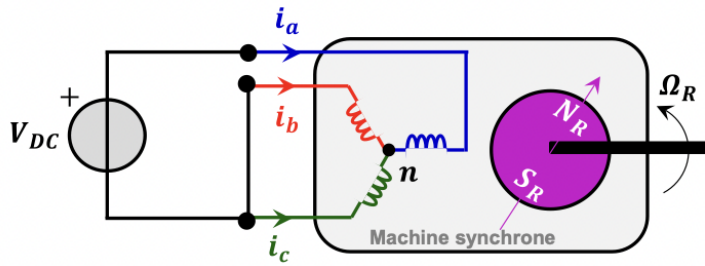


Figure 9: Schema de cablage (Mesure de Rs)

a) Rotation du rotor: La machine ne tourne pas car on souhaite qu'il n'y ait pas de force électromotrice afin de calculer la résistance rotorique.

b) Caractéristique

Le schéma électrique devient une source de tension connectée à une résistance R_s en série avec deux résistances R_s en parallèle.

On mesure un courant statorique de 100 A en régime permanent. La bobine est équivalente à un fil en régime permanent donc on peut directement calculer la résistance statorique:

$$V_{dc} = I \cdot \frac{3}{2} R_s \Rightarrow R_s = \frac{V_{dc}}{I} \cdot \frac{2}{3} = \frac{2}{100 * 3} = 6.7 \text{ m}\Omega$$

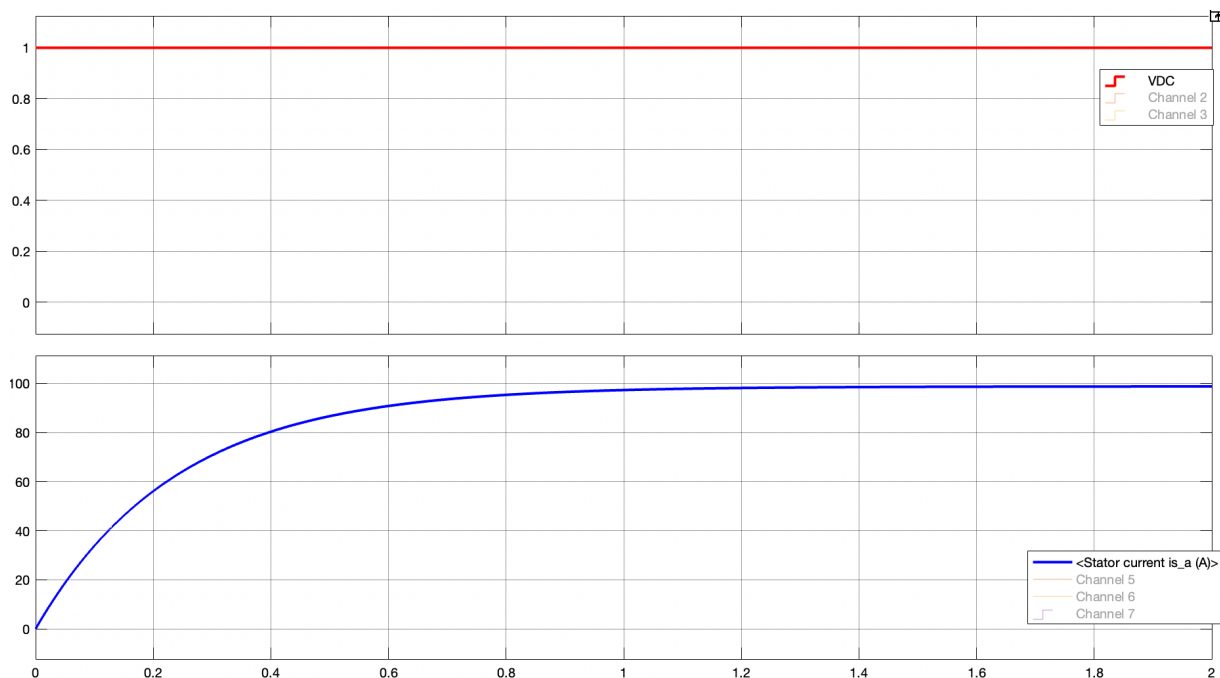


Figure 10: Visualisation pour une source de 1V

2.1.5 On fait tourner la machine synchrone à la vitesse $N_r = 3000$ tr/min et on réalise un court-circuit triphasé.

a) À $N_r = 3000$ tr/min, on a déterminé dans la partie 2.1.3.a) que la valeur efficace de la tension V_a est 79.55 V. On mesure aussi que la valeur efficace du courant I_a est 156.8 A.

On constate aussi que quand la vitesse de rotation N_r augmente, le courant de court-circuit augmente également.

b) En court-circuit, on a $\underline{E} = (R_s + j X_s) \underline{I}$

$$\sqrt{R_s^2 + X_s^2} = \frac{E_{eff}}{I_{eff}} = \frac{79.55}{156.8} = 0.507$$

$$\Rightarrow X_s = \sqrt{0.507^2 - 0.0067^2} = 0.5073 \, \Omega = L_{cs} \cdot \Omega$$

$$\Rightarrow L_{cs} = \frac{X_s}{\omega} = \frac{X_s}{\Omega} = 1.61 \text{ mH}$$

$\omega = \Omega$ car ici le nombre de paire de pôle est 1 ($\Omega = \omega/p$ donc $f = N_p/60$ et on mesure $f = 50$ Hz quand $N_r = 3000$ tr/min donc $p = 1$)

On peut déduire de cette expérience que l'inductance cyclique statorique $L_{cs} = 1.61$ mH.

c) On constate que quand la vitesse augmente, l'inductance ne change pas mais la réactance X_s augmente, quand la vitesse est suffisamment grande, R_s est négligeable devant X_s .

2.2 Fonctionnement en alternateur autonome débitant sur une charge triphasée équilibrée, purement résistive

La machine synchrone est maintenant entraînée à vitesse constante pour alimenter une charge triphasée équilibrée purement résistive.

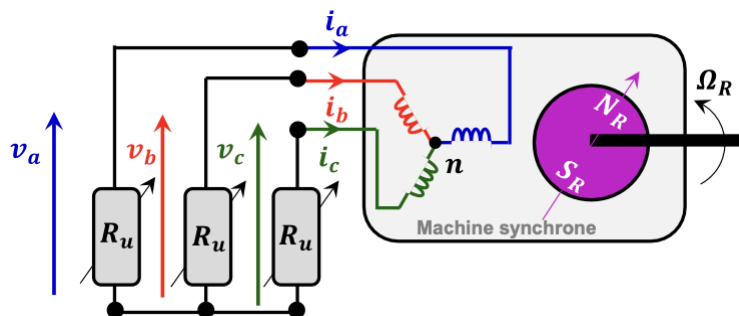


Figure 11: Schéma de câblage (fonctionnement en alternateur)

2.2.1 On adopte une fréquence de rotation $N_r = 6000$ tr/min

On mesure les valeurs efficaces de la tension $v_s(t)$ et du courant $i_s(t)$:

R_u	100Ω	10Ω	7.5Ω	5Ω	3Ω	2Ω	1Ω	0.5Ω
$I_s(A)$	1.591	15.82	21	31.15	50.15	70.8	111.5	140.6
$V_s(V)$	159.1	158.2	157.5	155.7	150.5	141.6	111.5	70.31
$C_{em}(Nm)$	1.208	11.96	15.8	23.19	36.11	48.02	59.74	47.84

Tableau de V_{seff} et I_{seff} : $N_r = 6000$ tr/min

2.2.2 Élément permettant de maintenir la vitesse de rotation:

La machine synchrone fonctionne en mode alternateur. Son rotor est entraîné par une turbine, par exemple.

L'équation mécanique donnant la dynamique de l'arbre de l'alternateur:

$$C_{tub} - C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt}$$

Le couple C_{tub} , est par exemple contrôlé par le débit d'eau dans une centrale hydraulique. Le couple C_{em} est en fait la perturbation subie quand la charge R_u varie. $d\Omega/dt$ est le paramètre à réguler, il faut le maintenir le plus constant possible. Afin d'avoir une variation de vitesse nulle, il faut que $C_{tub} - C_{em} = 0$, c'est-à-dire que $C_{tub} = C_{em}$.

2.2.3 Régulation de tension

Avec cette machine (MS à aimant permanent), on ne peut pas réguler la tension d'alimentation. D'abord on constate que quand la charge R_u diminue, les courants statoriques augmentent donc la chute de tension augmente ainsi. Afin d'augmenter la tension V_s , la seule moyenne est d'augmenter la vitesse de rotation ce qui augmente la force électromotrice générée en premier lieu. Or, la fréquence électrique est proportionnelle à la vitesse de rotation ($\Omega = \omega/p$), il ne faut pas modifier la fréquence afin de ne pas créer des phénomènes de saturation. On peut donc conclure qu'il est impossible de réguler la tension avec cette machine.

Au contraire, dans le cas d'une machine synchrone à rotor bobiné, on peut agir sur la tension V_s sans modifier la fréquence en augmentant le courant rotorique I_r . Afin de réguler la tension V_s fournie à R_u à la tension à vide (159.1 V) de la machine à $N_r = 6000$ tr/min, on simule le comportement en modifiant le 'flux linkage':

On trouve que quand le flux linkage est égale à **402.5e-3**, la valeur efficace de la tension Vs est de 159.1 V.

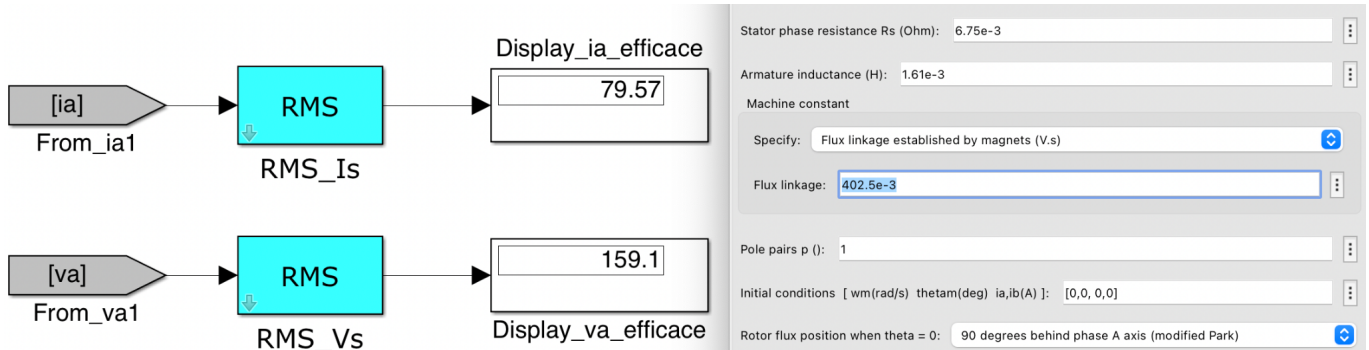


Figure 12: Vérification de la régulation de tension sur Simulink

2.3 Fonctionnement en moteur / frein avec alimentation en courant

2.3.1 On choisit une fréquence de 100 Hz pour les sources de courant et on impose un couple de charge de 50 Nm. On relève les valeurs suivante:

β : le déphasage entre E et Is

φ : le déphasage entre Vs et Is

Vs: la valeur efficace de Vs

Is	200A	150A	125A	100A	75A	50A	25A
β	70.79°	63.97°	58.22°	48.83°	28.63°	X	X
φ	-10.56°	-12.37°	-13.86°	-15.66°	-18.61°	X	X
Vs (V)	356.6	303.1	275	244.8	206.8	X	X
Cem(N.m)	50	50	50	50	50	X	X

Tableau: Cem = 50Nm

Le couple de charge étant 50 Nm, il faut fournir une puissance de

$$P = C_u \cdot \Omega_r = 50 \cdot 628 = 31.4 \text{ kW}$$

Si on fait l'approximation que $P_{em} = P = 31.4 \text{ kW}$ en négligeant les pertes associées, dans la condition optimale ($\beta = 0$) il faut au moins un courant de

$$I = \frac{P}{3E \cos \beta} = \frac{31400}{3 * 159 * 1} = 65.8 \text{ A}$$

C'est la raison pour laquelle quand Is = 50 A et 25 A, il est impossible de relever les valeurs car les résultats en simulation ne sont pas physiques.

On sait que :

$$C_{em} = \frac{P}{\Omega_r} = \frac{3E I_s \cdot \cos \beta}{\Omega_r} = 3\Phi_{sr} \cdot I_s \cdot \cos \beta$$

Remarque: Afin de minimiser les pertes Joules, il va de soi qu'il faut diminuer le courant statorique I_s . La meilleure option est donc de maximiser la valeur de $\cos\beta$. Elle est maximale quand le déphasage entre la force électromotrice E et le courant I_s est nul ($\beta = 0$). Cependant, cela n'est pas réalisable dans cette configuration car la machine n'est pas en mode autopilotage, il faut une boucle de retour pour connaître la position du rotor afin de réaliser $\beta = 0$.

2.3.2

I_s	200A	150A	125A	100A	75A	50A	25A
β	48.83°	28.64°	X	X	X	X	X
φ	-23.2°	-29.63°	X	X	X	X	X
V_s (V)	339.1	267.9	X	X	X	X	X
C_{em} (N.m)	100	100	X	X	X	X	X

Tableau: $C_{em} = 100\text{Nm}$

X: Erreurs, résultats non physiques

Le couple de charge étant 100 Nm, il faut fournir une puissance de

$$P = C_u \cdot \Omega_r = 100 \cdot 628 = 62.8 \text{ kW}$$

Si on fait l'approximation que $P_{em} = P = 62.8 \text{ kW}$ en négligeant les pertes associées, dans la condition optimale ($\beta = 0$) il faut au moins un courant de

$$I = \frac{P}{3E\cos\beta} = \frac{62800}{3 * 159 * 1} = 131.65 \text{ A}$$

C'est la raison pour laquelle quand $I_s < 131.65 \text{ A}$, il est impossible de relever les valeurs car les résultats en simulation ne sont pas physiques.

Le couple de charge est maintenant de -50 Nm, la machine est donc en freinage. On inverse le sens du courant pour que l'énergie soit possible d'être renvoyée vers la source d'alimentation

2.3.3

I_s	200A	150A	125A	100A	75A	50A	25A
β	109.2°	116°	121.8°	131.2°	151.3°	X	X
φ	11.19°	12.92°	14.1°	15.95°	18.94°	X	X
V_s (V)	356.2	302.6	274.5	244.2	206.2	X	X
C_{em} (N.m)	-50	-50	-50	-50	-50	X	X

Tableau: $C_{em} = -50\text{N.m}$

2.4 Fonctionnement en moteur / frein avec alimentation en courant autopilotée par la charge

2.4.1

On souhaite imposer maintenant un couple électromagnétique $C_{em} = 119.4 \text{ Nm}$.

On sait que $C_{em} = 3\Phi_r \cdot I \cdot \cos\beta$ Le couple est donc proportionnel au courant et n'est pas lié à la vitesse de rotation qui est en fait proportionnelle à la tension E .

On trouve qu'il suffit d'imposer un courant de 157.2 A pour avoir le couple 119.4 Nm.

Nr(tr/min)	1000	2000	4000	8000	12000
Vs,eff (V)	37.55V	76.19V	150.2	301.9V	450.6V
φ v/i	-43.86°	-44.2°	-44.79°	-44.84°	-44.88°
Pem(KW)	12.5	24.9	49.9	99.9	149.9

Tableau: $C_{em} = 119.4 \text{ N.m}$

2.4.2

D'après le tableau ci-dessus, pour une batterie avec une tension efficace limitée à 150 V, la plage de rotation permettant de produire le couple nominal est donc $Nr < 4000 \text{ tr/min}$. Quand la vitesse de rotation augmente, la tension V_s augmente également. Afin de diminuer la tension V_s et avoir la même vitesse, la seule possibilité est de jouer sur le courant I_s et l'angle de décalage β , ce qui change les vecteurs dans le diagramme Fresnel ainsi la tension V_s .

2.4.3

- a) On accepte de réduire le couple maximal produit en maintenant la puissance délivrée: on diminue le courant I_s .

Nr(tr/min)	4000	6000	8000	10000	12000
I_s,eff(A)	157.2	104.8	78.6	62.9	52.5
β	0°	0°	0°	0°	0°
Vs,eff(V)	150.2	191.8	245.6	276.4	335.8
φ v/i	-44.7°	-33.55°	-26.49°	-21.76	-18.43
Cem(N.m)	119.4	79.6	59.69	47.76	39.86
Pem(KW)	49.9	49.9	49.9	49.9	49.9

Les valeurs en vert ne respectent pas le cahier des charges car il faut fournir une tension V_s supérieure à 150 V.

b)

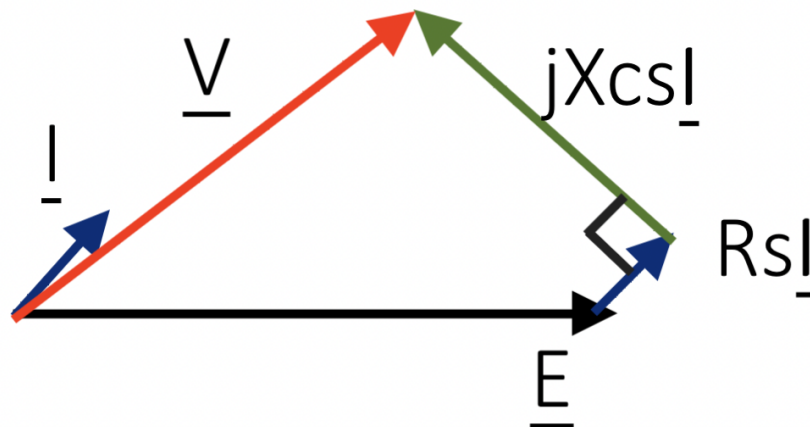
On modifie donc également l'angle de décalage β et pour les valeurs en rouge, le cahier des charges est complètement respecté pour toutes ces vitesses.

Nr(tr/min)	4000	6000	8000	10000	12000
$I_s, \text{eff(A)}$	157.2	117.2	111.2	113.4	117.3
β	0°	-26.6°	-45°	-56.3°	-63.4°
$V_s, \text{eff(V)}$	150.2	150.7	151.3	150.1	150.8
$\varphi \text{ v/i}$	-44.7°	-44.86	-45.17	-45.05	-45.2
$C_{em}(\text{N.m})$	119.4	79.6	59.72	47.79	39.89
$P_{em}(\text{KW})$	49.9	50.01	50.03	50.02	50.1

c) Diagramme de Fresnel

On a : $\underline{V} = \underline{E} + R_s \underline{I} + jX_{cs} \underline{I}$ quand la machine synchrone est en mode moteur

On obtient le diagramme de Fresnel suivant:



En modifiant l'angle de décalage β , on constate que si le courant I est en avance par rapport à la force électromotrice E , on peut diminuer la tension V_s tout en assurant la valeur de la force électromotrice (proportionnelle à la vitesse) souhaitée.

3. Conclusion du TP

On a étudié à travers ce TP comment identifier les paramètres d'une machine synchrone: la résistance statorique R_s , l'inductance cyclique statorique L_{cs} , le facteur K qui lie la vitesse de rotation à la force électromotrice.

On a également étudié par simulation le fonctionnement d'une machine synchrone en mode alternateur autonome ainsi qu'en mode moteur / frein, avec alimentation en courant et aussi en autopilotage.

Ce TP nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement d'une machine synchrone et de valider en pratique nos connaissances acquises en cours et en TD.