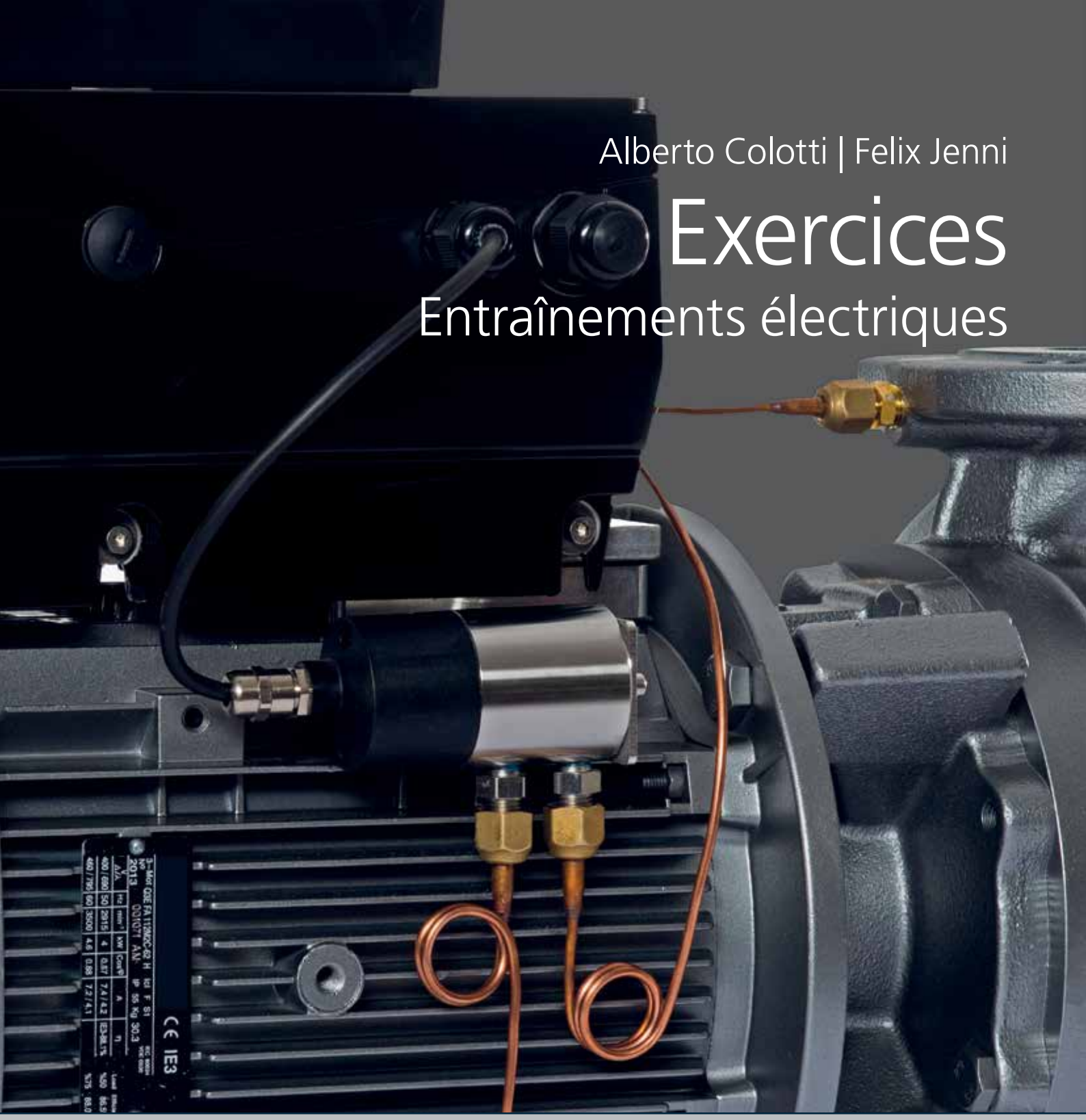
Alberto Colotti | Felix Jenni

Exercices

Entraînements électriques



faktor
Architektur Technik Energie

EnDK
Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie

suisseénergie

Contenu

1. Principes de base 3
1.1 Energie primaire 3
1.2 Consommation d'énergie d'un entraînement 3
1.3 Energie grise d'une machine asynchrone 3
1.4 Courant et tension sur des éléments réactifs 3
1.5 Valeurs moyenne et efficace 3
1.6 Puissances 4
1.7 Mouvement linéaire 4
1.8 Mouvement rotatif 4
1.9 Moment d'inertie 4

2. Applications d'entraînements électriques 5
2.1 Efficacité d'une chaine de transmission 5
2.2 Caractéristique statique de charge 5
2.3 Processus d'accélération 6
2.4 Système de levage (Convoyeur) 6

3. Machines électriques 7
3.1 Loi de l'induction 7
3.2 Machine à courant continu 7
3.3 Calcul transformateur 8
3.4 Machine asynchrone à rotor en court-circuit 8
3.5 Identification d'une pompe 9
3.6 ASM avec alimentation U/f 9
3.7 Machine synchrone sur le réseau 9
3.8 Machine synchrone à aimants permanents (PSM) 10

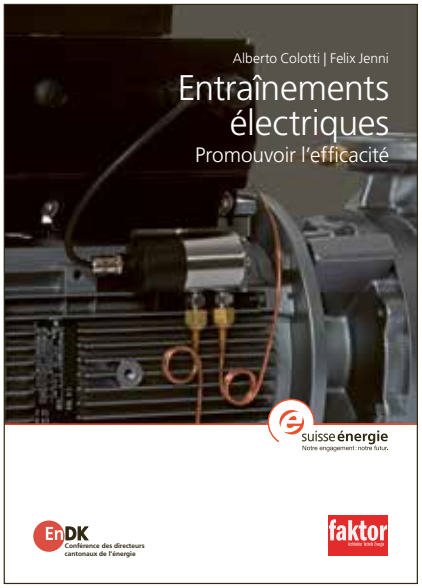
4. Electronique de puissance 11
4.1 Redresseur à diodes 11
4.2 Pertes dans un pont à diodes 11
4.3 Pont à Thyristor 11
4.4 Convertisseur de tension monophasé avec charge résistive 11
4.5 Hacheur abaisseur et pont monophasé (Pont en H) 11
4.6 Pont triphasé 12
4.7 Pertes dans un pont triphasé 12

5. Entraînements électriques 13
5.1 Processus d'accélération 13
5.2 Étoile-triangle 13
5.3 ASM en couplage étoile 14
5.4 Alimentation au réseau 14
5.5 Alimentation U/f d'une ASM 14
5.6 Alimentation U/f d'une SM 14
5.7 Affaiblissement du champ pour une PSM 15

6. Dimensionnement et mise en œuvre 16
6.1 Services types et échauffement 16
6.2 Broche d'entraînement 16
6.3 Dimensionnement d'une transmission 17
6.4 Protection d'un entraînement avec fusible coupe-circuit 17
6.5 Protection d'un entraînement par déclenchement thermique ou magnétique 17

Version Mars 2021

Cahier d'exercices



Entraînements électriques – Promouvoir l'efficacité.
Faktor Verlag, 2021, 192 Pages.
Auteurs: Alberto Colotti, Felix Jenni.
Acquisition: En téléchargement (sans frais) sous energieschweiz.ch

Corrigés

1. Principes de base 19
1.1 Energie primaire 19
1.2 Consommation d'énergie d'un entraînement 19
1.3 Energie grise d'une machine asynchrone 19
1.4 Courant et tensions sur des éléments réactifs 19
1.5 Valeurs moyenne et efficace 20
1.6 Puissances 20
1.7 Mouvement linéaire 20
1.8 Mouvement rotatif 21
1.9 Moment d'inertie 21

2. Application d'entraînements électriques 22
2.1 Efficacité d'une chaîne de transmission 22
2.2 Caractéristique statique de charge 22
2.3 Processus d'accélération 23
2.4 Système de levage (Convoyeur) 24

3. Machines électriques 27
3.1 Loi de l'induction 27
3.2 Machine à courant continu 28
3.3 Calcul transformateur 30
3.4 Machine asynchrone à rotor en court-circuit 31
3.5 Identification d'une pompe 32
3.6 ASM avec une commande U/f 33
3.7 Machine synchrone sur le réseau 35
3.8 Machine synchrone à aimants permanents 36

4. Electronique de puissance 38
4.1 Redresseur à diodes 38
4.2 Pertes dans un pont à diodes 38
4.3 Pont à Thyristor 38
4.4 Convertisseur de tension monophasé avec charge résistive 39
4.5 Hacheur abaisseur et pont monophasé (Pont en H) 39
4.6 Pont triphasé autopiloté 40
4.7 Pertes dans un pont triphasé 40

5. Entraînements électriques 41
5.1 Processus d'accélération 41
5.2 Étoile-triangle 42
5.3 ASM en couplage étoile 42
5.4 Alimentation au réseau 43
5.5 Alimentation U/f d'une ASM 44
5.6 Alimentation U/f d'une SM 44
5.7 Affaiblissement du champ pour une PSM 46

6. Dimensionnement et mise en œuvre 47
6.1 Services type et échauffement 47
6.2 Broche d'entraînement 48
6.3 Dimensionnement d'une transmission 49
6.4 Protection d'un entraînement avec fusible coupe-circuit 50
6.5 Protection d'un entraînement par déclenchement thermique ou magnétique 50

1. Principes de base

1.1 Energie primaire

La consommation d'énergie primaire mondiale en Mtoe est connue.
a. Convertir la consommation d'énergie primaire en Wh et J.

1.2 Consommation d'énergie d'un entraînement

Les entraînements représentent, avec environ 50 %, le plus grand groupe de consommateurs d'énergie électrique. Rechercher pour la Suisse:

a. La consommation totale des entraînements en kWh et en MJ.
b. L'économie d'énergie, si 25 % de l'énergie utilisée pour les entraînements pouvait être économisée.
c. Les économies pour un coût de l'énergie de 0.2 Fr./kWh.

1.3 Energie grise d'une machine asynchrone

L'énergie grise d'une machine peut être calculée de diverses manières. Deux approches différentes peuvent être comparées. Soit une machine asynchrone avec les données catalogue suivantes: Poids 102 kg; Prix unitaire: 1800 Fr.
Proportion estimée de métal: Fer 89 %, Cuivre 6 %, Aluminium 5 %.

a. Quelle est l'énergie totale requise pour la fabrication d'une machine, si elle est déterminée par l'énergie particulière de chaque matériau?
b. Quels sont les coûts de l'énergie grise de la machine, si elle est produite en Allemagne?
c. Comparer le résultat obtenu avec le prix de vente – Commentaire?

1.4 Courant et tension sur des éléments réactifs

Le comportement des inductances et des capacités peut être vérifié à l'aide de la figure 1.1. La forme du signal peut indifféremment être un courant ou une tension.

a. Une inductance de 1 mH est parcourue par le courant représenté à la figure 1.1 à gauche. Quelle est la forme d'onde de la tension aux bornes de l'inductance?
b. Le courant de la figure 1.1 à droite circule dans une capacité de 1 mF. Quelle est la tension aux bornes du condensateur. ($u_C(t=0)=0$)?

1.5 Valeurs moyenne et efficace

a. Quelle est la valeur moyenne du courant de la figure 1.1 à gauche?
b. Quelles sont les valeurs moyenne et efficace du courant de la figure 1.1 à droite.

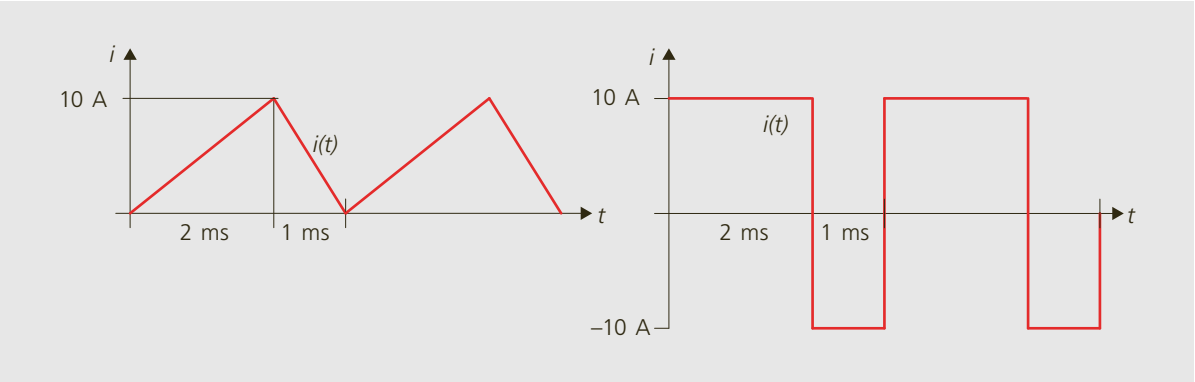


Figure 1.1: Courants en fonction du temps (Exercice 1.4).

1.6 Puissances
Dans un système triphasé 400 V, le courant de 20 A est déphasé de 30 degrés par rapport à la tension de phase.

a. Calculer la puissance apparente, active et réactive pour cette application.
b. Calculer le nouveau courant pour une même puissance active, mais avec un déphasage nul.

1.7 Mouvement linéaire
Une masse de 1 kg à l'arrêt est accélérée à l'aide d'une force de 10 N.
a. Quels sont la vitesse et le chemin parcouru après 10 s.

1.8 Mouvement rotatif
Une machine avec une inertie de 0,1 kgm^2 fournit à partir de la vitesse nulle un couple de 5 Nm.
a. Quelle vitesse et quel angle de rotation atteint-elle au bout de 5 s.

1.9 Moment d'inertie
Un turbogénérateur avec un moment d'inertie de 15000 kgm^2 est freiné avec un couple de –100 Nm.
a. Combien de temps faut-il pour qu'il passe de 3000 rpm à 0 rpm?

2. Applications d'entraînements électriques

2.1 Efficacité d'une chaine de transmission

Un système de transport doit amener 5 t de matériaux par minute à une hauteur de 5 m. Les composants de la chaîne ont les rendements énergétiques suivants :

- bande transport et système de déviation : 75 %
- transmission mécanique : 85 %
- moteur électrique : 88 %
- convertisseur : 94 %
- conducteurs etc. 98 %

a. Quelle est la puissance utile pour cette application?
b. Pour quelle puissance à l'arbre le moteur doit-il être choisi?
c. Quelle est la puissance fournie par le réseau?
d. Quels sont les coûts des pertes de la machine électrique par année, si le prix de l'énergie est de 20 ct./kWh et si le taux d'utilisation de la machine est de 50 % ?

2.2 Caractéristique statique de charge

Un entraînement enrouleur doit embobiner une feuille de papier avec une force de traction et une vitesse constantes (figure 2.1). La force de traction est de 150 N pour une vitesse de 5 m/s. Le rouleau sur lequel la feuille est enroulée a un diamètre initial de 150 mm, et un diamètre de 500 mm une fois le processus terminé.
a. Quels sont la vitesse de rotation et le couple au début et à la fin du processus? Dessiner la caractéristique statique de charge (n(M)) dans un diagramme à l'échelle.
b. Quelle est la puissance au début et à la fin de l'enroulement?

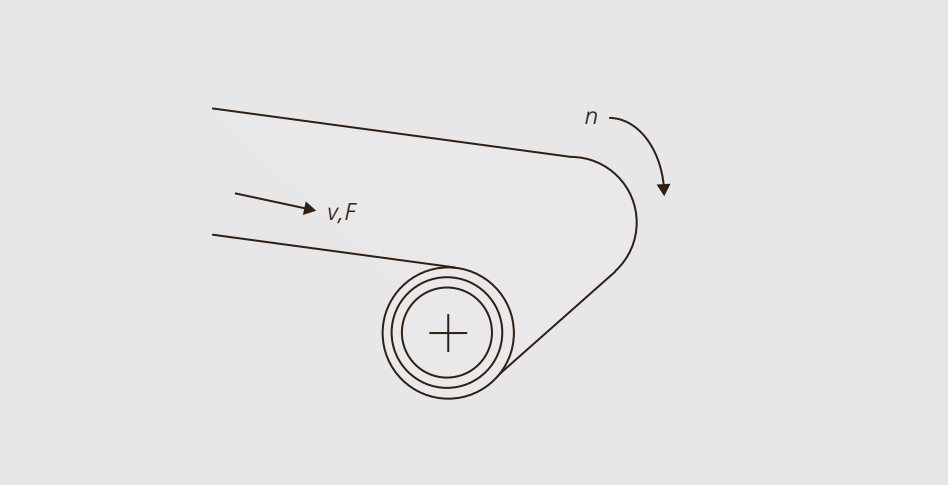


Figure 2.1: Entraînement enrouleur avec diamètre d'enroulement variable (Exercice 2.2).

2.3 Processus d'accélération

Les caractéristiques statiques couple/vitesse d'un entraînement (*M_M*) et deux différentes charges (*M_L1* und *M_L2*) sont représentées à la figure 2.2.

a. Estimer, à l'aide du graphique, le temps nécessaire à l'accélération d'une inertie de 4 kgm² jusqu'à proximité du point de fonctionnement.

2.4 Système de levage (Convoyeur)

La bande de transport représentée à la figure 2.3, inclinée de 60°, doit transporter une masse de 50 kg à une hauteur de 10 m. Le système est assumé idéal sans perte. Le tapis roulant pèse 2 kg par mètre et a une longueur totale (aller-retour) de 25 m. Les rouleaux ont un diamètre de 250 mm et un moment d'inertie de 0.4 kgm². Le moteur est directement connecté à un rouleau. La vitesse admissible de la bande est de 2 m/s. Le transport doit être réalisé en 10 s. Un profil de vitesse sans secousse peut être considéré.

a. Quelle distance doit parcourir la masse sur la bande de transport?

b. Quels sont les temps nécessaires d'accélération pour le démarrage et pour le freinage (hypothèse : même temps d'accélération et de freinage) pour atteindre les objectifs?

c. Dessiner la trajectoire, la vitesse et l'accélération de la masse durant les 10 s.

d. Quels couples d'accélération, à vitesse constante et de freinage doit fournir le moteur?

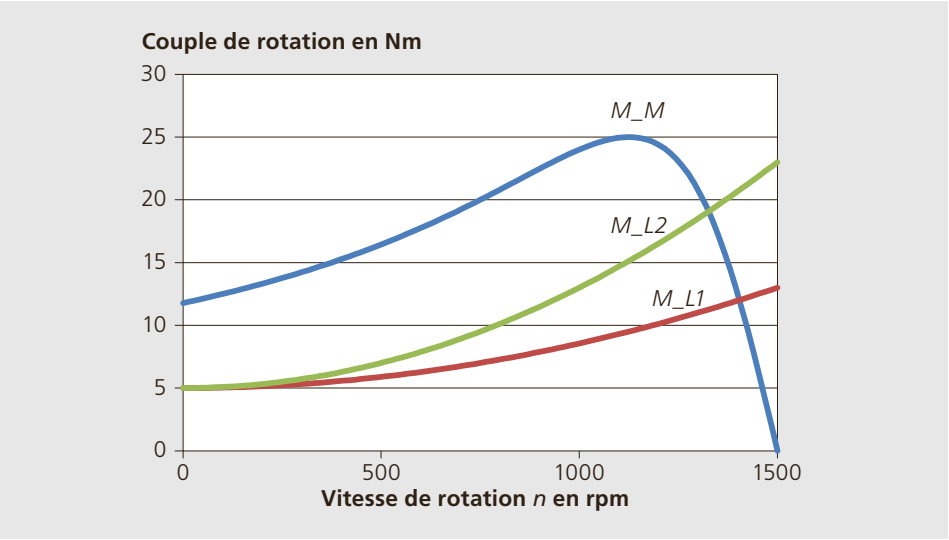


Figure 2.2: Caractéristique statique M avec les charges L1 et L2 (Exercice 2.3).

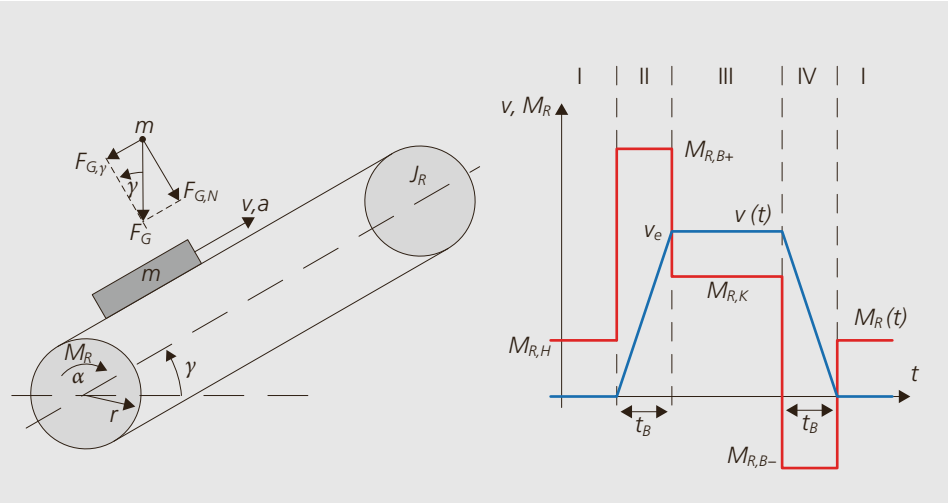


Figure 2.3: Système de levage par convoyeur incliné avec exemple des caractéristiques couple et vitesse en fonction du temps. (Exercice 2.4).

3. Machines électriques

3.1 Loi de l'induction

Une bobine carrée (nombre de spires N_U) branchée à un voltmètre, est retirée avec une vitesse v de l'entrefer d'un circuit magnétique (figure 3.1). Le circuit magnétique est magnétisé à l'aide d'une bobine avec un nombre de spires N_I alimentée en courant continu. La longueur moyenne du fer est l_{Fe} et l'entrefer δ. La perméabilité du fer est constante et sa perméabilité relative vaut $\mu_{r,Fe} = 1000$.
La figure 3.1 représente la position de la bobine carrée par rapport à l'entrefer au temps $t = 0$. À partir de cet instant, la bobine est tirée vers la droite en dehors de l'entrefer avec une vitesse v. Les grandeurs suivantes sont données :

- ϕ = 0,36 mVs
- l_{Fe} = 30 cm; δ = 1 mm
- $A_\delta = A_{Fe}$ = 4 cm² (carré $b \cdot b$); a = 1,5 cm
- v = 1 m/s
- N_U = 5; I = 3 A

a. Représenter la tension aux bornes du voltmètre en faisant figurer son amplitude ainsi que les temps relatifs à ce mouvement.
b. Marquer à l'aide des signes + et – la polarité de la tension.
c. Calculer le nombre de spires N_I nécessaire de la bobine fixe pour la création du flux, lorsqu'elle est alimentée par un courant continu. Que vaut le nouveau courant I si l'entrefer δ est doublé?
d. Désigner le sens du courant de la source de courant par une flèche.

3.2 Machine à courant continu

Une petite machine à courant continu est excitée par aimants permanents. Les pertes fer et les frottements mécaniques sont supposés nuls. Les données suivantes sont disponibles :

Puissance mesurée	P_N	= 4 W
Tension d'induit au point de fonctionnement	U_{AN}	= 12 V
Courant d'induit au point de fonctionnement	I_{AN}	= 0,5 A
Vitesse de rotation nominale	n_N	= 12 000 rpm

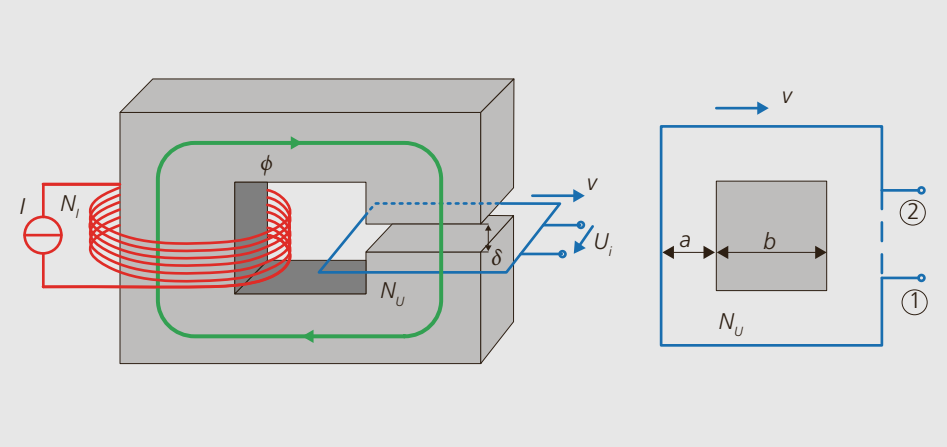


Figure 3.1: Circuit magnétique avec entrefer (Exercice 3.1).

a. Calculer le couple nominal M_N et la constante de couple k_T de la machine.
b. Que vaut la tension induite au point de fonctionnement? Que vaut la résistance d'induit R_A?
c. Quel est le rendement de la machine au point de fonctionnement?
d. Dessiner la caractéristique statique de la machine ($M = f(n)$) avec la tension d'alimentation nominale U_{AN}.
e. Quel est le courant de démarrage I_{A0} et le couple de démarrage M_0 d'après cette caractéristique statique?
f. Quelle tension U_A aux bornes de l'induit faut-il appliquer pour le point de fonctionnement $M = 2$ mNm et $n = 6000$ rpm? Tracer la caractéristique statique obtenue dans le graphique. Que valent le courant de démarrage et la vitesse à vide pour cette tension? Quel est le rendement pour ce point?

3.3 Calcul transformateur

Certaines caractéristiques d'un transformateur monophasé de 50 Hz connecté entre deux phases du réseau 400 V doivent être déterminées. Le noyau a été sélectionné dans un catalogue en fonction de ses performances. Les grandeurs suivantes sont données :

- Puissance apparente primaire — 10 kVA
- Tension — 400 V (Valeur efficace!)
- Surface du noyau en fer — $A_{Fe} = 10 \cdot 10$ cm^2
  Longueur du chemin dans le fer — $l_{Fe} = 100$ cm
- Masse volumique — $\rho_{Fe} = 7700$ kg/m^3
- Longueur moyenne d'une spire — 70 cm
- Induction maximale — $\hat{B} = 1{,}4$ T
- Densité de courant — $J = 2$ A/mm^2
  résistivité $\rho = 0{,}0175 (\Omega\,\text{mm}^2/\text{m})$
- Chiffre de perte du noyau en fer — $_{v15} = 3$ W/kg

a. Combien faut-il de spires N_1 pour que l'induction maximale $\hat{B}$ soit atteinte avec la valeur crête de la tension $\hat{u}_1$?
b. Quelle est la valeur du courant $I_1 = I_N$ dans l'enroulement primaire pour la puissance apparente S_1 et quelle est la section du fil $A_{Cu,1}$ à la densité de courant donnée?
c. Calculer la longueur de fil $l_{Cu,1}$ de l'enroulement N_1 et la résistance résultante R_1.
d. Que valent les pertes de cuivre $P_{V,Cu,1}$ pour le courant nominal I_N dans l'enroulement primaire et combien les estimez-vous pour les deux enroulements si le même espace disponible pour les enroulements du primaire et du secondaire est considéré?
e. Calculer le poids du transformateur et les pertes dans le fer $P_{V,Fe}$
f. Quel est le rendement du transformateur lorsqu'il est chargé avec un courant nominal et un $\cos\varphi = 0{,}9$?

3.4 Machine asynchrone à rotor en court-circuit

Une machine asynchrone à rotor en court-circuit est connectée en triangle et les grandeurs suivantes sont indiquées sur la plaque signalétique:

- $U_N = 400$ V; Δ; $f_N = 50$ Hz; $P_N = 5{,}5$ kW; $I_N = 10{,}0$ A (Courant de ligne); $n_N = 1430$ rpm; $\cos\varphi_N = 0{,}87$
- résistance statorique de phase $R_S = 2{,}1\ \Omega$

La mesure à vide donne: $U_N = 400$ V; $I_L = 2{,}3$ A (Courant de ligne); $P_{el} = 60$ W. Le calcul peut être basé sur un fonctionnement à vide idéal $s = 0$.

a. Calculer pour le point de fonctionnement nominal la puissance d'entrée et le rendement.
b. Calculer pour le point de fonctionnement nominal et à vide les pertes par effet Joules au stator et les pertes fer de la machine.
c. Déterminer le nombre de paires de pôles de la machine.
d. Calculer pour le point de fonctionnement nominal le glissement ainsi que la puissance d'entrefer de la machine et les pertes rotoriques.

3.5 Identification d'une pompe

La machine asynchrone 2 pôles d'une pompe a un rotor en court-circuit et est connectée en triangle. Les résultats, aux bornes L de la machine, des essais à vide et en court-circuit à 50 Hz sont :

- à vide (Index 0) : $U_{LL,0}=400$ V; $I_{L,0}=80$ A; $P_{S,0}=4{,}5$ kW
- à l'arrêt (Index k) : $U_{LL,k}=45$ V; $I_{L,k}=220$ A; $P_{S,k}=5{,}6$ kW

La résistance mesurée aux bornes de la machine vaut 30 mΩ. Les frottements de la machine sont négligeables.
a. Calculer les paramètres du schéma équivalent simplifié de la machine $X_\sigma=X_{S\sigma}+X'_{R\sigma}$, R_S, R'_R, R_{Fe} et X_h.

3.6 ASM avec alimentation U/f

Une machine asynchrone 4 pôles connectée en étoile fonctionnant sous 50 Hz a les caractéristiques suivantes :

- $U_N=400$V (Tension de ligne); $P_{N,mech}=4{,}6$ kW;
  $n_N=1440$ rpm; $s_K=25$ %
- les pertes mécaniques ainsi que les pertes statoriques sont négligeables

a. Que valent le glissement nominal s_N et le couple de décrochage M_K de la machine?
b. La vitesse de la machine est augmentée par accroissement de la fréquence f_S avec une tension d'alimentation constante U_N. De ce fait, le couple de décrochage M_K en fonctionnement stationnaire diminue. Jusqu'à quelle vitesse de rotation, en mode d'affaiblissement du champ, la machine peut-elle fonctionner à puissance nominale constante?

3.7 Machine synchrone sur le réseau

Une machine synchrone fonctionnant sur le réseau a les caractéristiques suivantes :

- paires de pôles $p=2$
- alimentation triphasée, $U_N=400$ V, 50 Hz, couplage Δ
- rotor symétrique avec $L_S=L_d=L_q=10$ mH, la résistance statorique est négligeable

La machine fonctionne avec une tension induite $U_P=U_N$. Au point nominal, l'angle de charge vaut $\vartheta=20°$.

a. Quelle est la vitesse de rotation nominale n_N de la machine?
b. Que valent le couple de décrochage M_K et le couple nominal M_N?
c. Que vaut la puissance nominale P_N?
d. Que valent le courant à vide I_0 et le courant nominal I_N?
e. Que doit valoir la tension induite U_P, pour que la puissance active $P=0$ et la puissance réactive $Q=20$ kVAr soient fournies au réseau?

3.8 Machine synchrone à aimants permanents (PSM)

La fiche technique d'une PSM fournit les caractéristiques suivantes :

- nombre de pôles : $2p = 4$
- couple nominal : $M_N = 1{,}4$ Nm
- constante de couple $k_T = 1{,}46$ Nm/A
- résistance statorique $R_{2Ph} = 32{,}3\ \Omega$
- inductance statorique $L_{2Ph} = 73$ mH

La machine doit fournir le couple nominal à la vitesse nominale de 4500 rpm. Les valeurs de la résistance et de l'inductance statorique correspondent aux valeurs entre 2 bornes de la machine, ce qui est indiqué avec l'index $_{2Ph}$. Ceci est valable quel que soit le couplage de la machine.

a. Quel est le courant nominal I_N de la machine et quelles sont les pertes $P_{VS,N}$ dans les conducteurs au point de fonctionnement nominal? Quelle est l'influence du couplage sur les calculs et le résultat final?
b. La machine est alimentée avec un courant sur l'axe q uniquement. Quelle tension doit être appliquée aux bornes de la machine pour un fonctionnement au point nominal?

4. Electronique de puissance

4.1 Redresseur à diodes

Tension et ondulation du circuit intermédiaire
Un réseau triphasé est aussi reconstitué dans les avions. Une combinaison tension-fréquence fréquemment rencontrée est de 115 V, 400 Hz. Dans l'avion des redresseurs à diodes triphasés avec des éléments de lissage purement capacitifs sont utilisés.

a. Quelle est la valeur de crête de la tension du circuit intermédiaire?
b. Quelle est la valeur moyenne de la tension, lorsque toujours deux diodes conduisent?
c. Quelles sont les quatre premières fréquences qui apparaissent sur la tension du circuit intermédiaire?
d. Les valeurs de crêtes du courant côté réseau sont trop grandes – Quelle action peut-on entreprendre du côté réseau pour les diminuer?

4.2 Pertes dans un pont à diodes

La tension du circuit intermédiaire d'un pont à diodes triphasé connecté au réseau 400 V est de 540 V. La charge branchée au circuit intermédiaire consomme une puissance de 10 kW. Seules les pertes de conduction des diodes sont prises en compte.

a. Calculer le courant dans le circuit intermédiaire.
b. Calculer la valeur moyenne du courant par diode.
c. Calculer les pertes par diode (Choisir une chute de tension constante).
d. Calculer le rendement du redresseur (quelle est la puissance consommée?).

4.3 Pont à Thyristor

Au Japon il existe des réseaux triphasés 173 V/60 Hz.

a. Quelle est la tension maximale (valeur moyenne) du circuit intermédiaire qui peut être atteinte?
b. Quelle est la tension du circuit intermédiaire pour un angle de retard à l'amorçage de $\alpha = 60°$?
c. Que vaut le déphasage φ du courant par rapport à la tension pour $\alpha = 60°$?

4.4 Convertisseur de tension monophasé avec charge résistive

Une alimentation pour lampe à incandescence avec un convertisseur de tension est étudiée. La lampe consomme une puissance de 75 W sous une tension de 230 V.

a. De quel type de charge est la lampe (ohmique, inductive, …)?
b. Quelle est la tension appliquée à l'ampoule et quelle est la puissance active pour des angles de retard à l'amorçage de $\alpha = 30°$ et $\alpha = 90°$?
c. Quelle est la puissance apparente côté réseau pour les deux cas?
d. Que vaut le facteur de puissance λ du côté réseau dans les deux cas?

4.5 Hacheur abaisseur et pont monophasé (Pont en H)

Un hacheur abaisseur et un pont en H sont considérés. Les deux sont alimentés avec une tension continue de $U_d = 300$ V (source de tension constante) et la valeur de crête du courant du semi-conducteur vaut 20 A.

a. Quelles sont la tension de sortie et la puissance correspondante pour un abaisseur avec $m = 0{,}7$.
b. Quelles sont les puissances maximales possibles pour un pont monophasé?
c. Une tension de sortie sinusoïdale doit être imposée avec ce pont monophasé. Quelle est l'amplitude de la fondamentale et sa valeur efficace, ainsi que la puissance possible pour un $\cos\varphi = 1$?
d. Une machine à courant continu fournit 2kW en retour lors du freinage. Pour quelle valeur de courant faut-il régler le circuit de freinage?

4.6 Pont triphasé

Un pont triphasé avec des IGBT est alimenté par un pont à diodes au réseau 400 V et est utilisé pour l'alimentation d'un moteur normé 400 V. La tension du circuit intermédiaire est lissée et vaut 540 V. La valeur maximale du courant de sortie de chaque phase est de 100 A et la charge a un $\cos\varphi = 0{,}8$.

a. Quelle sera la tension maximale, entre phases, à la sortie du convertisseur pour une modulation simple?
b. Quelle sera la tension maximale de sortie, si la troisième harmonique est ajoutée à la valeur de consigne?
c. Que valent les puissances actives et apparentes maximales pour les deux cas?
d. Que valent les puissances actives et réactives si le moteur est directement connecté au réseau 400 V?

4.7 Pertes dans un pont triphasé

Un pont triphasé avec un courant de sortie sinusoïdal de 10A par phase (valeur efficace, valeur moyenne par demi-période de 9A) est commuté à 9 kHz par branche. Le convertisseur de courant est alimenté par le réseau en monophasé et la tension du circuit intermédiaire vaut environ 300 V. Avec $U_d = 300$ V les pertes par commutation pour chaque commutation et par semi-conducteur sont de 0,8 mWs.

a. Calculer les pertes par conduction du semi-conducteur (Choisissez une chute de tension constante).
b. Que valent les pertes par commutation?
c. Que vaudraient les pertes par commutation et conduction pour une application au réseau 400 V?

5. Entraînements électriques

5.1 Processus d'accélération

Une machine asynchrone (ASM) sans charge avec une puissance nominale de 5,5 kW, un courant nominal de 10 A et une vitesse de rotation nominale de 1440 min^{-1} doit être accélérée de l'arrêt à la vitesse de rotation nominale. L'inertie totale vaut $J = 0{,}02\ kg\,m^2$. Les caractéristiques de la machine à la figure 5.1 sont données pour un couplage triangle. Combien de temps faut-il dans ce cas pour atteindre le point de fonctionnement?
Remarque: Pour simplifier, il est admis que $M_M \approx const = M_{M,AVG}$. Quel est le courant maximal qui apparaitra (la pointe de courant due au déphasage à l'enclenchement est négligée) si:

a. L'ASM est accélérée en couplage triangle.
b. L'ASM est accélérée jusqu'à 750 min^{-1} avec un couplage étoile et est ensuite couplée en triangle.
c. L'ASM est accélérée jusqu'à 1250 min^{-1} avec un couplage étoile et est ensuite couplée en triangle.
d. L'ASM est accélérée jusqu'à la vitesse de synchronisme avec un couplage étoile et seulement à ce moment elle est couplée en triangle.

5.2 Étoile-triangle

Une machine asynchrone (ASM) est dimensionnée pour une tension de phase de 230 V (c.-à-d. couplage étoile pour le réseau 400 V). Le courant nominal est de 12 A.

a. Que se passerait-il, si cette machine était utilisée avec un couplage étoile-triangle?
b. Que valent les pertes cuivre au point de fonctionnement nominal pour un couplage étoile et triangle, si la résistance de chaque phase du stator vaut $R_S = 0{,}40\ \Omega$ à la température de fonctionnement?
c. Quelles sont les changements au niveau du courant de ligne?

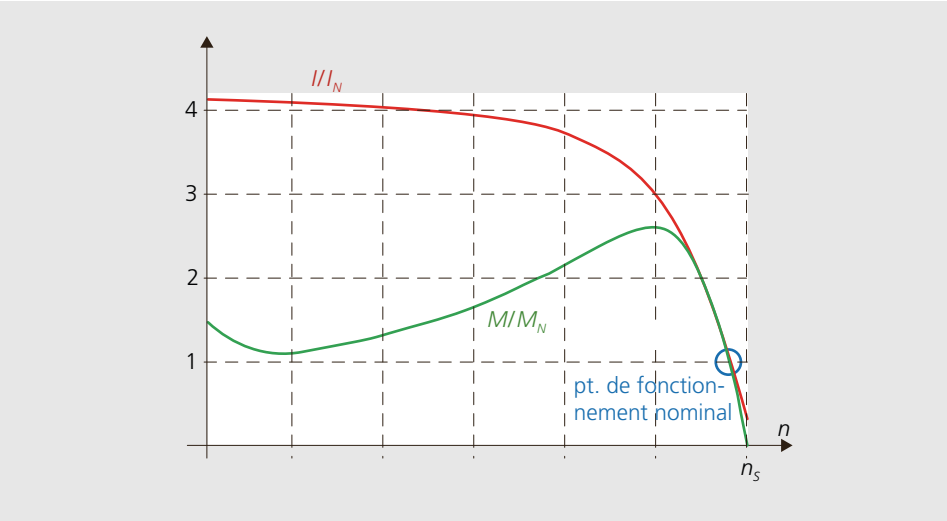


Figure 5.1: Caractéristique de couple et de courant pour l'ASM couplée en triangle (Exercice 5.1).

5.3 ASM en couplage étoile

Une machine asynchrone avec les grandeurs nominales $U_N = 400\,V$, $I_N = 7\,A$, $\cos\varphi = 0{,}8$ est dimensionnée pour être couplée en étoile.

a. Quelle est la tension de phase U_S de la machine?
b. Que valent la puissance active, réactive et apparente consommées au point de fonctionnement nominal?
c. Que vaut la puissance fournie à l'arbre (approximation réaliste)?
d. Que valent les pertes par effet Joule $P_{V,Cu}$ au point de fonctionnement nominal, si la résistance statorique de phase est de $R_S = 1{,}2\ \Omega$ à la température de fonctionnement?

5.4 Alimentation au réseau

Une machine asynchrone (ASM) avec une puissance nominale de 3 kW, un courant nominal de 5,9 A et une vitesse de rotation de 1440 min^{-1} doit entraîner une charge. Le couple de charge est égal au couple nominal durant la première moitié du temps d'utilisation (index 1), et 25 % du couple nominal durant l'autre moitié (index 2). Dans ce qui suit, seules les pertes statoriques avec une résistance de phase de $R_S = 1{,}5\,\Omega$ et les pertes rotoriques sont considérées. La machine est connectée en étoile et est raccordée au réseau 50 Hz.

a. Combien de paires de pôles possède la machine et quel est son glissement nominal?
b. Que vaut le rendement au point de fonctionnement?
c. Que vaut le rendement pour $M = M_n/4$, quand le courant statorique à ce point de fonctionnement est de 4,2 A?
d. Est-ce que l'utilisation d'un convertisseur de fréquence est intéressant pour cette application?

5.5 Alimentation U/f d'une ASM

La plaque signalétique d'une machine asynchrone connectée en triangle donne: $P_N = 3\,kW$, $U_N = 400\,V$, $I_N = 5{,}9$ A, $f_N = 50$ Hz, $n_N = 1440$ min^{-1}. La résistance statorique de phase est mesurée et vaut $R_S = 1{,}5\,\Omega$ et le courant à vide est de $I_0 = 3$ A. Pour cette machine les caractéristiques U/f pour le couple de charge nominal et à vide doivent être définies.

a. Quel offset de tension devra être imposé à l'arrêt (pour $f_S \approx 0$) pour assurer la magnétisation nominale?
b. Quel offset de tension devra être imposé à l'arrêt pour fournir un couple nominal?
c. Quelle est la tension de sortie du convertisseur de courant pour la vitesse de rotation nominale et le couple nominal?
d. Quel est le glissement nominal de la machine?
e. À quelle vitesse tourne la machine avec une fréquence statorique de 35 Hz à vide et de combien doit être augmentée la fréquence statorique pour une charge à couple nominal et pour une vitesse qui reste égale à la vitesse à vide?

5.6 Alimentation U/f d'une SM

Une machine synchrone à aimants permanents pour les USA est connectée en étoile et les informations sur la plaque signalétique sont 480 V / 15 A / 60 Hz. La résistance de phase statorique est mesurée et vaut $R_S = 0{,}8\,\Omega$. Une mesure en génératrice à vide donne une tension aux bornes de la machine de $U_{S,0} = 432\,V$ à 60 Hz. Au point nominal le courant est exactement en phase avec la tension induite. Pour cette machine, les points nécessaires pour un fonctionnement U/f seront calculés.

a. Quelle est la puissance interne mécanique $P_{i,me}$ de la machine (puissance mécanique sans pertes dues aux frottements et ventilation)? à quelle tension le courant statorique est-il en phase?
b. Quelle est la tension nominale de phase d'un enroulement?
c. Quel est l'offset de tension U_{Boost} à l'arrêt pour un couple nul et un couple nominal?
d. Quelle est l'équation de la tension induite en fonction de la fréquence?
e. Quelle est la valeur de l'inductance L_S (remarque: l'influence de R_S est négligeable)?
f. Que se passe-t-il lorsque la machine à vide est connectée au réseau européen 400 V / 50 Hz?

5.7 Affaiblissement du champ pour une PSM

Une machine synchrone à aimants permanents, couplée en étoile, doit fonctionner jusqu'à 1,5 fois la vitesse de rotation nominale en mode d'affaiblissement du champ. Les grandeurs nominales sont 400 V / 15 A / 50 Hz. La tension à vide à 50 Hz est de 360 V et L_d vaut 21 mH. R_S peut être négligée.

a. Que doit valoir le courant d'affaiblissement du champ I_d à 75 Hz? La tension du convertisseur de courant reste constante à 400 V.
b. Quel courant dans l'axe q est admissible, si le courant nominal $I_{S,n}$ ne doit pas être dépassé? Interprétation?
c. Comparer le résultat b) de manière qualitative avec celui attendu avec une ASM.

6. Dimensionnement et mise en œuvre

6.1 Services types et échauffement

Pour la réalisation d'une application, le profil de couple est donné à la figure 6.1. La vitesse de rotation est constante.

a. Quel service type suivant la norme IEC 60034-1 se rapproche le plus de ce profil? Nommer deux exemples possibles pour une telle charge.
b. Que vaut le couple efficace nécessaire?
c. La machine choisie a un couple de fonctionnement S1 de 18 Nm et atteint un échauffement de 80 K. La température maximale admise est de 120 °C. La machine a une constante de temps thermique T_{Th} de 30 secondes. Quel échauffement moyen sera atteint pour la charge donnée?
d. Evaluer l'augmentation de température qui aura lieu durant le temps où la charge est de 20 Nm. Pour ce faire, l'échauffement thermique peut être modélisé par l'approximation linéaire:

$$\Delta T \approx \Delta T_N \frac{t}{T_{Th}} \left(\frac{M}{M_N} \right)^2$$

e. Entre quelles valeurs va osciller la température, lorsque la machine se trouve dans un milieu à 40 °C et que la variation de température varie de manière symétrique autour de la valeur moyenne calculée de la température?

6.2 Broche d'entraînement

Une broche d'entraînement, représentée à la figure 6.2, doit déplacer une masse de 100 kg entre 2 points distants de 1 m. Un profil de vitesse trapézoïdal est imposé, afin d'atteindre la plus petite durée de déplacement. La broche utilisée à un pas de 10 mm et un servomoteur avec résolveur est utilisé pour réaliser le mouvement. La précision de mesure est d'un angle de 20 minutes (1/3° mécanique). Pour le dimensionnement, l'entraînement est supposé idéal, c.-à-d. le système n'a aucune perte par frottements.
a. Est-ce que la précision de mesure du résolver est suffisante, pour pouvoir positionner la charge avec une précision de 0,5 mm? Quelle propriété du système contraint cette précision théorique?
b. Quelle vitesse maximale doit être atteinte, pour réaliser le mouvement en 2 s?
c. Quel couple devra fournir la machine et quelle est la puissance maximale que devra fournir le convertisseur de courant?

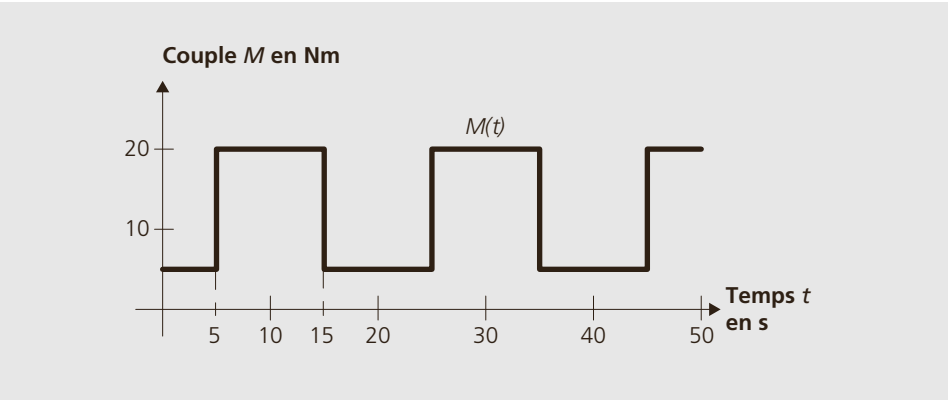


Figure 6.1: Profil de charge (Exercice 6.1).

d. Quelle énergie sera récupérée par le circuit intermédiaire durant la phase de freinage (Hypothèse: convertisseur de courant idéal)?
e. Le convertisseur de courant est alimenté par le réseau 400 V. Pendant la phase d'accélération, le redresseur côté réseau peut fournir la puissance requise et la tension du circuit intermédiaire est maintenue à la tension nominale de 560 V. Quel condensateur faut-il utiliser pour que l'augmentation de tension acceptable durant la phase de freinage ne dépasse pas 80 V? Pour cette estimation, les pertes peuvent être négligées.

6.3 Dimensionnement d'une transmission
Une charge d'inertie $J_L = 3 \cdot 10^{-2}$ kg m² doit en $t_B = 100$ ms accélérer d'une vitesse de rotation n_L à 800 rpm.
Pour cet entraînement, trois machines sont à disposition:
1. Entraînement direct $n_{max} = 800$ rpm et $J_{M1} = 2{,}5 \cdot 10^{-2}$ kg m².
2. Machine avec $n_{max} = 3000$ rpm et $J_{M1} = 4{,}6 \cdot 10^{-3}$ kg m².
3. Petite machine avec $n_{max} = 24\,000$ rpm et $J_{M1} = 7{,}4 \cdot 10^{-5}$ kg m².
a. Dimensionner pour les trois machines un rapport de transmission adapté en respectant la vitesse de rotation maximale de la machine et en minimisant le couple. Que vaut le couple pour chaque machine?

6.4 Protection d'un entraînement avec fusible coupe-circuit
Pour une application, un entraînement de 15 kW fonctionnant au réseau triphasé 400 V / 50 Hz est utilisé. Le rendement total du convertisseur de courant est 95 % et le facteur de puissance côté réseau est de $cos\varphi = 0{,}90$. Une machine ASM IE3 avec 2 paires de pôles est utilisée (figure 6.1). Les valeurs de 10, 13, 16, 20, 25, 35, 50, 63 et 100 A lent et rapide sont à disposition pour assurer la sécurité.

a. Quel est le rendement nominal η de la machine choisie selon les classes d'efficacité?
b. Quels seront les puissances actives P_N et apparentes S_N consommées au niveau du réseau?
c. Que vaut le courant du réseau I_N?
d. Sur quelle valeur le convertisseur de courant doit-il être sécurisé et quelle caractéristique de sécurité allez-vous choisir? Justifier.

6.5 Protection d'un entraînement par déclenchement thermique ou magnétique
Une machine asynchrone connectée au réseau triphasé 400 V produit durant 20 % du temps une puissance de 150 % de la valeur nominale et pendant les 80 % restant, 30 % de la puissance nominale. Le cycle dure 2s. Pour la puissance nominale le courant de ligne est de 50 A et le $cos\varphi = 0{,}85$. La puissance réactive peut être considérée indépendante de la charge.

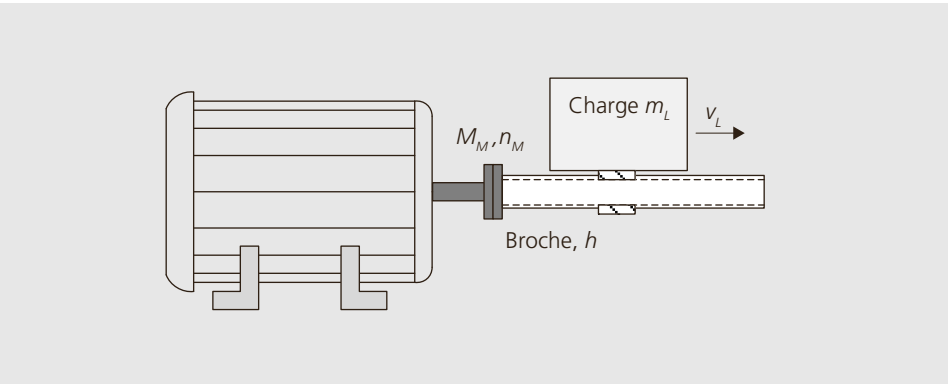


Figure 6.2: Transformation d'un mouvement rotatif en un mouvement linéaire à l'aide d'une broche (Exercice 6.2).

L'entraînement doit être protégé thermiquement et magnétiquement contre une surcharge.

a. Quelle est la puissance réactive de la machine?

b. Que vaut la puissance apparente dans les deux cas?

c. Que valent les courants du réseau pour une charge de 20 % et 150 %?

d. Quelle est la valeur efficace moyenne du courant de ligne qui détermine le déclenchement thermique?

e. Sur quelles valeurs les sécurités thermiques et magnétiques doivent-elles être ajustées, si la valeur limite ne doit pas dépasser 30 % de la valeur efficace?

1. Principes de base

1.1 Energie primaire

a. La teneur en énergie d'une mégatonne de pétrole (Mtoe) est $E = 41{,}9 \cdot 10^{15}$ J et l'énergie totale consommée dans le monde est de $13 \cdot 10^3$ Mtoe. La conversion donne :

$$E_{monde} = 13 \cdot 10^3 \,\text{Mtoe} \cdot 41{,}9 \cdot 10^{15} \,\text{J/Mtoe} = \underline{544{,}7 \cdot 10^{18} \,\text{J}}$$
$$= 151{,}3 \cdot 10^{15} \,\text{Wh} = \underline{151{,}3 \,\text{PWh}}$$

1.2 Consommation d'énergie d'un entraînement

a. Les moteurs consomment environ la moitié de l'énergie électrique totale. Ceci représente pour la Suisse $E_{el,tot} \approx$ 60 TWh, selon le graphique.

$$E_{mot} \approx 0{,}5\, E_{el,tot} = \underline{30 \,\text{TWh}} = \underline{108 \,\text{PJ}}$$

b. Si pour les entraînements 25 % pourrait être économisé :

$$E_{économie,\, mot} \approx E_{mot}\, 0{,}25 = \underline{7{,}5 \,\text{TWh}} = \underline{27 \,\text{PJ}}$$

c. Les économies potentielles par an pour un coût de 0.2 Fr./kWh sont :

$$\textit{économie possible} = E_{économie,\, mot} \cdot 0.2 \,\text{Fr./kWh} = \underline{1.5 \,\text{Mrd Fr./An}}$$

1.3 Energie grise d'une machine asynchrone

a. Coûts de l'énergie par matériaux:

$$E_{fer} \approx 102 \,\text{kg} \cdot 0{,}89 \cdot 7 \,\text{kWh/kg} = \underline{636 \,\text{kWh}}$$
$$E_{cuivre} \approx 102 \,\text{kg} \cdot 0{,}06 \cdot 17 \,\text{kWh/kg} = \underline{104 \,\text{kWh}}$$
$$E_{aluminium} \approx 102 \,\text{kg} \cdot 0{,}05 \cdot 43 \,\text{kWh/kg} = \underline{219 \,\text{kWh}}$$
$$E_{moteur} \approx \underline{956 \,\text{kWh}}$$

b. Pour 1.3 $, environ 1 kWh d'énergie grise peut être «achetée» en Allemagne.

$$\text{coûts} \approx E_{moteur} / (1{,}3 \,\text{kWh/\$}) = \underline{737 \,\text{\$}}$$

c. En règle général, il est d'usage d'admettre qu'un tiers des coûts d'acquisition équivaut au coup de l'énergie grise, par conséquent 1800 Fr./3= <u>600 Fr.</u> Ces estimations se recoupent bien entre-elles.

1.4 Courant et tensions sur des éléments réactifs

(Représenté à la figure 1.1)

a. Tension aux bornes d'une inductance (1 mH) :

$$u_L = L \cdot di_L/dt \;(= 1 \,\text{mH} \cdot di_L/dt)$$

b. Tension aux bornes d'une capacité (1 mF) :

$$u_C(t) = u_{C,0} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i_C(\tau)\, d\tau \;\; \left(= \frac{1}{1 \,\text{mF}} \cdot \int_0^t i_C(\tau)\, d\tau\right)$$

1.5 Valeurs moyenne et efficace

a. La valeur moyenne du courant triangulaire vaut :

$$I_{DC} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t)dt = \frac{1}{3\text{ms}} \left(\frac{10\text{A}}{2} 3\text{ ms} \right) = \underline{5\text{A}}$$

b. De la même manière, la valeur moyenne du courant carré vaut:

$$I_{DC} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t)dt = \frac{1}{3\text{ms}} (10\text{ A} \cdot 2\text{ms} - 10\text{ A} \cdot 1\text{ms}) = \underline{3{,}33\text{ A}}$$

Pour la valeur efficace (Valeur moyenne quadratique) du courant carré, il résulte :

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t)dt} = \sqrt{\frac{1}{3\text{ms}} ((10\text{A})^2 \cdot 2\text{ms} + (-10\text{A})^2 \cdot 1\text{ms})} = \underline{10\text{A}}$$

Remarque par rapport à la valeur efficace : L'élévation au carré élimine le signe négatif du signal. Dès lors une représentation graphique permet très souvent d'établir la valeur efficace. Dans ce cas précis, les parties négatives sont redressées et le courant est constant. L'amplitude représente alors la valeur efficace.

1.6 Puissances

a. Les différentes puissances valent :

$$S = \sqrt{3} U_{eff} I_{eff} = \sqrt{3} UI = \sqrt{3} \cdot 400\text{V} \cdot 20\text{ A} = \underline{13{,}9\text{kVA}}$$

$$P = \sqrt{3} UI \cos(\varphi) = \sqrt{3} \cdot 400\text{V} \cdot 20\text{A} \cdot \cos(30°) = \underline{12{,}0\text{kW}}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(13{,}9\text{kVA})^2 - (12{,}0\text{kW})^2} = \underline{7{,}01\text{kVAr}}$$

b. Le courant pour une puissance active de 12,0 kW se calcule comme suit :

$$P = \sqrt{3} UI \cos(\varphi) \quad \Rightarrow \quad I = P / (\sqrt{3} U \cos(0°)) = 12\text{kW} / (\sqrt{3} \cdot 400\text{V} \cdot 1) = \underline{17{,}33\text{ A}}$$

1.7 Mouvement linéaire

a. Les équations fondamentales sont utilisées comme point de départ :

$$F = m \cdot a \quad \Rightarrow \quad a = F/m$$

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a(\tau)d\tau \quad \text{et} \quad s = s_0 + \int_0^t v(\tau)d\tau$$

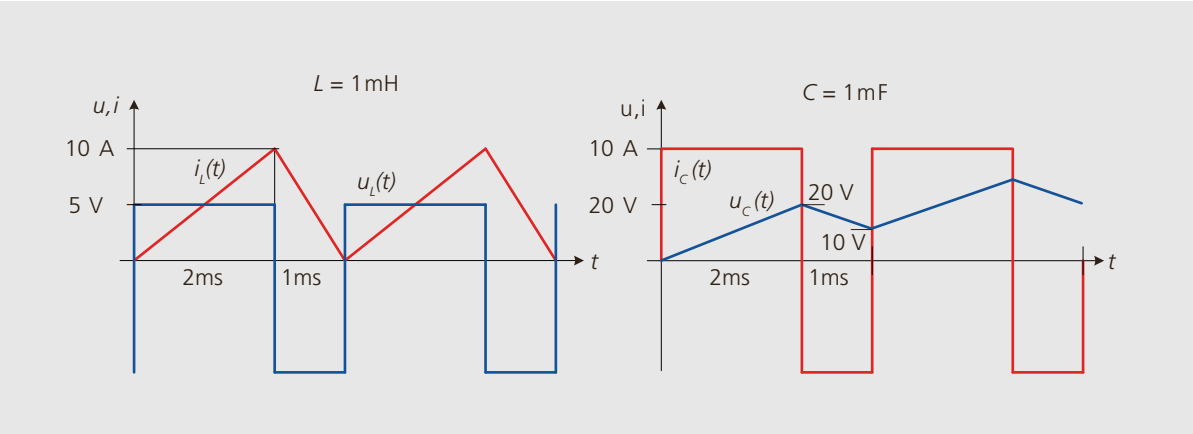


Figure 1.1: Représentation courant/tension de l'exercice 1.4.

Avec une accélération constante, de même qu'une vitesse initiale et une position nulle, il vient :

$$a = F/m = 10\,\mathrm{N}/1\mathrm{kg} = 10\,\mathrm{N/kg} = \underline{10\,\mathrm{m/s^2}}$$

$$v(t = 10\mathrm{s}) = \int_0^{10\mathrm{s}} a \cdot dt = a \cdot t = 10\,\mathrm{m/s^2}\,10\mathrm{s} = \underline{100\,\mathrm{m/s}}$$

$$s(t = 10\mathrm{s}) = \int_0^{10\mathrm{s}} a \cdot t \cdot dt = \frac{a}{2} t^2 = \underline{500\mathrm{m}}$$

1.8 Mouvement rotatif

a. Par analogie au mouvement linéaire il advient :

$$M = J \cdot d\Omega/dt \quad \Rightarrow \quad d\Omega/dt = M/J$$

$$\Omega(t) = \Omega_0 + \frac{M}{J}\,t \quad \text{et} \quad \varphi = \varphi_0 + \int_0^t \Omega(t')\,dt'$$

Avec une accélération constante, de même qu'une vitesse de rotation initiale et une position angulaire nulle, il vient :

$$d\Omega/dt = M/J = 5\,\mathrm{Nm}/0{,}1\ \mathrm{kgm^2} = 50\ \mathrm{N}/\mathrm{kgm} = 50\,\mathrm{rad/s^2}$$

$$\Omega(t = 5\mathrm{s}) = \frac{M}{J}\,t = 50\,\mathrm{rad/s^2}\,5\mathrm{s} = \underline{250\,\mathrm{rad/s}}$$

$$n(t = 5\mathrm{s}) = \Omega \cdot 60/2\pi = \underline{2387\,\mathrm{rpm}}$$

$$\varphi(t = 5\mathrm{s}) = \int_0^{5\mathrm{s}} \frac{M}{J} \cdot t' \cdot dt' = \frac{50\,\mathrm{rad/s^2}}{2}\,5^2 = \underline{625\,\mathrm{rad}}$$

1.9 Moment d'inertie

a. En utilisant les équations de l'exercice précédant :

$$\Omega(t) = \Omega_0 + \int_0^t \frac{d\Omega}{d\tau} \cdot d\tau$$

$$= \Omega_0 + \int_0^t \frac{M}{J} \cdot d\tau = \Omega_0 + \frac{M}{J} \cdot t \overset{!}{=} 0$$

$$t = -\frac{\Omega_0 \cdot J}{M}$$

$$\Omega_0 = n_0 \cdot \frac{2\pi}{60} = 314{,}16\ \mathrm{rad/s}$$

$$t = -\frac{314{,}16\ \mathrm{rad/s} \cdot 15\,000\ \mathrm{kg} \cdot \mathrm{m^2}}{-100\,\mathrm{Nm}} = \underline{47\,124\,\mathrm{s}}$$

$$= 13{,}09\,\mathrm{h}$$

2. Application d'entraînements électriques

2.1 Efficacité d'une chaîne de transmission

a. La puissance utile se calcule à partir du travail par unité de temps. L'énergie pour une durée d'une minute vaut :

$$E = m \cdot g \cdot h = 5000\,\text{kg} \cdot 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5\text{m} = 245\,\text{kJ} = 245\,\text{kWs}$$

Ainsi: $P = \dfrac{245{,}2\text{kWs}}{60\text{s}} = \underline{4{,}09\text{kW}}$

b. La puissance à l'arbre est plus petite due aux rendements de la bande, du système de déviation (F) et de la transmission mécanique (G). Par conséquent, le moteur doit délivrer plus de puissance que les 4,09 kW :

$P_{M,mech} = \dfrac{P}{\eta}$; avec $\eta = \eta_F \cdot \eta_G \rightarrow P_{M,mech} = \dfrac{4{,}09\text{kW}}{0{,}75 \cdot 0{,}85} = \dfrac{4{,}09\text{kW}}{0{,}638} = \underline{6{,}41\text{kW}}$

c. Afin de calculer la puissance fournie par le réseau, les rendements du moteur (M), du convertisseur (U) et des conducteurs (Z) doivent être pris en compte.

$$P_N = \frac{P_{M,mech}}{\eta_M \cdot \eta_U \cdot \eta_Z} = \frac{6{,}41\text{kW}}{0{,}88 \cdot 0{,}94 \cdot 0{,}98} = \frac{6{,}41\text{kW}}{0{,}81} = \underline{7{,}91\text{kW}}$$

d. Sur la base de la puissance transmise par le moteur, la puissance absorbée par la machine peut être évaluée et les pertes obtenus par différence avec la puissance mécanique :

$$P_{V,M} = \frac{P_{M,mech}}{\eta_M} - P_{M,mech} = P_{M,mech}\left(\frac{1}{\eta_M} - 1\right) = 6{,}41\text{kW}\left(\frac{1}{0{,}88} - 1\right) = 874\,\text{W}$$

Pour un taux d'utilisation de 12 h par jour, le coût de l'énergie vaut :

$$E_V = P_{V,M} \cdot t_B = 874\,\text{W} \cdot 12\text{h} \cdot 365\text{d} = 3829\,\text{kWh}$$

$$\rightarrow \text{ coûts } = 3829\,\text{kWh} \cdot \frac{0.20\text{ Fr.}}{\text{kWh}} = \underline{766\text{ Fr.}}$$

2.2 Caractéristique statique de charge

a. La vitesse de rotation et le couple au début du processus d'enroulage valent :

$$M_A = F \cdot r_A = 150\,\text{N} \cdot \frac{0{,}15\text{m}}{2} = \underline{11{,}3\text{Nm}}$$

$$n_A = \frac{v}{2\pi \cdot r_A} \cdot 60\text{s/min} = \frac{5\frac{\text{m}}{\text{s}}}{2\pi \cdot 0{,}075\,\text{m}} \cdot 60\text{s/min} = \underline{637\text{rpm}}$$

La vitesse de rotation et le couple à la fin du processus d'enroulage valent :

$$M_E = F \cdot r_E = 150\,\text{N} \cdot \frac{0{,}5\text{m}}{2} = \underline{37{,}5\text{Nm}}$$

$$n_E = \frac{v}{2\pi \cdot r_E} \cdot 60\text{s/min} = \frac{5\text{m/s}}{2\pi \cdot 0{,}25\text{m}} \cdot 60\text{s/min} = \underline{191\text{rpm}}$$

Le produit du couple et de la vitesse de rotation est constant puisque la force d'enroulement et sa vitesse sont constantes :

$$P = F \cdot v \rightarrow P = 150\,N \cdot 5\text{m/s} = \underline{750\,\text{W}}$$

Vérification

Début: $P_A = M_A \cdot \Omega_A = 11{,}3\text{Nm} \cdot \frac{637\text{rpm}}{60} \cdot 2\pi = \underline{750\,\text{W}}$

Fin: $P_E = 37{,}5\text{Nm} \cdot \frac{191\text{rpm}}{60} \cdot 2\pi = \underline{750\,\text{W}}$

La caractéristique statique hyperbolique est représentée à la figure 2.1.

2.3 Processus d'accélération

a. Le point de fonctionnement stationnaire, voir graphique, se trouve à l'intersection de la caractéristique de charge de l'entraînement et de la charge. Le point de fonctionnement donne la vitesse atteinte finale. Pour les deux charges il résulte :

$n_{E_L1} \approx 1400\text{rpm}$; $n_{E_L2} \approx 1300\text{rpm}$

Pendant le processus d'accélération, la différence entre M_M et M_L est disponible. Cette différence peut être calculée à l'aide des courbes. Si le couple est approximé par une constante «MB», alors «Omega» sera aussi constant.

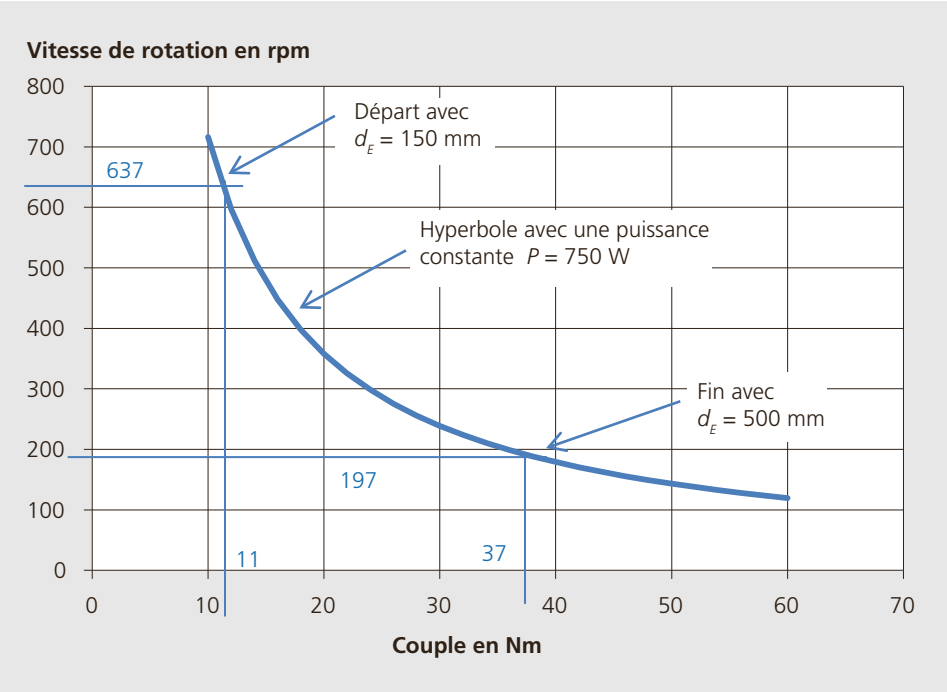


Figure 2.1: Caractéristique couple-vitesse à puissance constante de l'enrouleur (Exercice 2.2).

Cas M_L1

Pour 0 rpm: $M_{BA} \approx 12\text{Nm} - 5\text{Nm} = 7\text{Nm}$

Valeur maximale: $M_{BM} \approx 15\text{Nm}$

Valeur moyenne: $M_B \approx \frac{7\text{Nm}+15\text{Nm}}{2} = \underline{11\text{Nm}}$

Le temps d'accélération de l'arrêt à la vitesse maximale peut être calculé au moyen de l'accélération angulaire $\dot{\Omega}$ et du changement de vitesse $\Delta\Omega$:

$$T_B = \frac{\Delta\Omega}{\dot{\Omega}};\ \Delta\Omega = \Omega_{E_L1}$$

$$\dot{\Omega} = \frac{M}{J} = \frac{11\text{Nm}}{4\text{kgm}^2} = \underline{2{,}75\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}};\ \Omega_{E_L1} = \frac{2\pi \cdot n_{E_L1}}{60} = \underline{147\frac{\text{rad}}{\text{s}}}$$

$$T_B = \frac{147\frac{\text{rad}}{\text{s}}}{2{,}75\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}} = \underline{53\text{s}}$$

Cas M_L2

Pour toute la gamme de vitesse il peut être admis que $M_B \approx 7\text{Nm}$ est constant.

$$T_B = \frac{\Delta\Omega}{\dot{\Omega}};\ \dot{\Omega} = \frac{M}{J} \rightarrow T_B = \frac{\Delta\Omega \cdot J}{M_B}$$

$$T_B = \frac{\Omega_{E_L2} \cdot J}{M_B} = \frac{\frac{2\pi \cdot n_{E_L2}}{60} \cdot J}{M_B} = \frac{136\frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot 4\text{kgm}^2}{7\text{Nm}} = \underline{78\text{s}}$$

Remarque: En théorie, la vitesse finale n'est jamais tout à fait atteinte puisque le couple d'accélération M_B tend vers zéro lorsqu'on approche du point de fonctionnement.
Un temps de démarrage de 53 s réciproquement de 78 s est très long pour un petit moteur. Le cas échéant le moteur ne peut pas tourner longtemps avec cette charge accouplée, puisque l'accélération est plus contraignante que le point de fonctionnement.

2.4 Système de levage (Convoyeur)

a. Le chemin parcouru par la masse sur la bande de transport peut être calculé par trigonométrie (figure 2.2):

$$s_{\text{course}} = \frac{10m}{\sin(60°)} = \underline{11{,}6\text{m}}$$

b. Le temps d'accélération maximal pour le démarrage et pour le freinage peut être déterminé par la relation suivante: Le trajet total se compose d'un temps d'accélération et d'un temps de freinage ($2 \times t_B$) de même qu'un temps (t_K) à vitesse constante. Comme la durée totale du trajet est connue (10 s) et que l'accélération est constante (vitesse moyenne = vitesse maximale $v_m/2$), La durée du trajet à vitesse constante peut être exprimée au moyen du temps d'accélération / freinage ($t_K = T - 2 \times t_B$) → Il ne reste donc qu'une seule inconnue t_B:

$$s_{\text{course}} = t_K \cdot v_m + 2t_B \cdot \frac{v_m}{2}$$

$$= (T - 2t_B) \cdot v_m + 2t_B \cdot \frac{v_m}{2} = T \cdot v_m - 2t_B \cdot v_m + t_B \cdot v_m = T \cdot v_m - t_B \cdot v_m$$

$$\rightarrow t_B = T \cdot v_m - s_{\text{course}} \frac{1}{v_m} = (10\text{s} \cdot 2\frac{\text{m}}{\text{s}} - 11{,}6\text{m}) \cdot \frac{1}{2\frac{\text{m}}{\text{s}}} = \underline{4{,}23\text{s}}$$

c. Le graphique doit être construit de telle sorte que l'abscisse corresponde au temps $t = 10$ s. Le temps d'accélération et de freinage est connu: $t_B = 4{,}23$ s; la durée du trajet à vitesse constante peut être calculée :

$$t_K = 10\text{s} - 2 \cdot 4{,}23\text{s} = 1{,}55\text{s}$$

$$a = \frac{v}{t} \rightarrow a_B = \frac{2\frac{\text{m}}{\text{s}}}{4{,}23\text{s}} = 0{,}47\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Vérification :

$$\left.\begin{aligned} s_B &= \frac{v_m}{2} \cdot t_B = 4{,}23\text{m} \\ s_K &= v_m \cdot t_K = 3{,}1\text{m} \end{aligned}\right\} s = s_K + 2 \cdot s_B = 11{,}6\text{m}$$

d. la force nécessaire pour une vitesse constante avec une déclivité doit d'abord être calculée :

$$F_{G,\gamma} = F_G \cdot \sin(60°)$$

$$F_G = m \cdot g = 50\text{kg} \cdot 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}} = 490\text{N} \rightarrow F_{G,\gamma} = 50\text{kg} \cdot 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sin(60°) = \underline{424\text{N}}$$

Le couple du moteur est dépendant du rayon des rouleaux :

$$M_K = F_{G,\gamma} \cdot r_R = 424\text{N} \cdot \frac{0{,}25\text{m}}{2} = 53{,}1\text{Nm}$$

Démarrage: Le couple M_B est le produit de l'inerte J_T et de l'accélération angulaire $\dot{\Omega}$:

$$M_B = J_T \cdot \dot{\Omega}$$

L'inertie totale J_T se compose de l'ensemble des inerties de chaque composant : 2 x rouleaux J_R, masse de la bande transporteuse et de la masse transportée. Pour une masse transportée au travers d'un rouleau de rayon r_R :

$$J = m \cdot r_R^2$$

$$J_T = 2 \cdot J_R + \frac{m_B}{l} l_B \cdot r_R^2 + m_M \cdot r_R^2$$

$$J_T = 2 \cdot 0{,}4\,\text{kgm}^2 + 2\frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 25\,\text{m} \cdot (\frac{0{,}25}{2})^2 + 50\,\text{kg} \cdot (\frac{0{,}25}{2})^2$$

$$J_T = 0{,}8\,\text{kgm}^2 + 0{,}78\,\text{kgm}^2 + 0{,}78\,\text{kgm}^2 = \underline{2{,}36\,\text{kgm}^2}$$

L'accélération angulaire $\dot{\Omega}$ s'obtient avec la vitesse de rotation des rouleaux et le temps d'accélération associé t_B:

$$n_m = \frac{v_{max}}{\pi d} \cdot 60\text{s/min} = \frac{2\text{m/s}}{\pi \cdot 0{,}25\text{m}} \cdot 60\text{s/min} = \underline{153\text{rpm}}$$

$$\dot{\Omega} = \frac{n_m}{t_B} \cdot \frac{2\pi}{60} = \frac{153\text{rpm}}{4{,}23\text{s}} \cdot \frac{2\pi}{60} = \underline{3{,}78\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}}$$

$$M_B = J_T \cdot \dot{\Omega} = 2{,}36\text{kgm}^2 \cdot 3{,}78\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} = \underline{8{,}94\text{Nm}}$$

Le couple de démarrage M_{MA} s'obtient en additionnant le couple nécessaire à vitesse constante M_K et le couple d'accélération M_B:

$$M_{MA} = M_K + M_B = 53{,}1\text{Nm} + 8{,}94\text{Nm} = \underline{62{,}0\text{Nm}}$$

Durant le freinage, le couple M_{MB} est plus faible que le couple à vitesse constante M_K:

$$M_{MB} = M_K - M_B = 53{,}1\text{Nm} - 8{,}94\text{Nm} = \underline{44{,}2\text{Nm}}$$

Remarque: La puissance maximale P_{max} sera demandée à la fin de l'accélération:

$$P_{max} = M_{MA} \cdot \frac{n_m}{60} \cdot 2\pi = 62{,}0\text{Nm} \cdot \frac{153\text{rpm}}{60} \cdot 2\pi = \underline{992\text{W}}$$

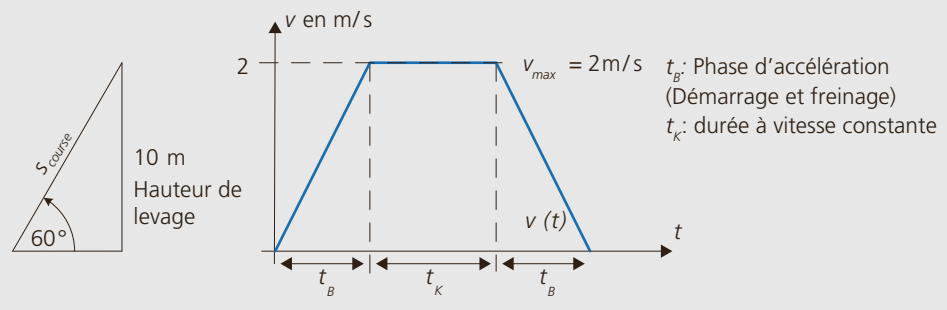


Figure 2.2: Bande de transport du convoyeur et profil de vitesse avec la limite de vitesse v_{max} (Exercice 2.4).

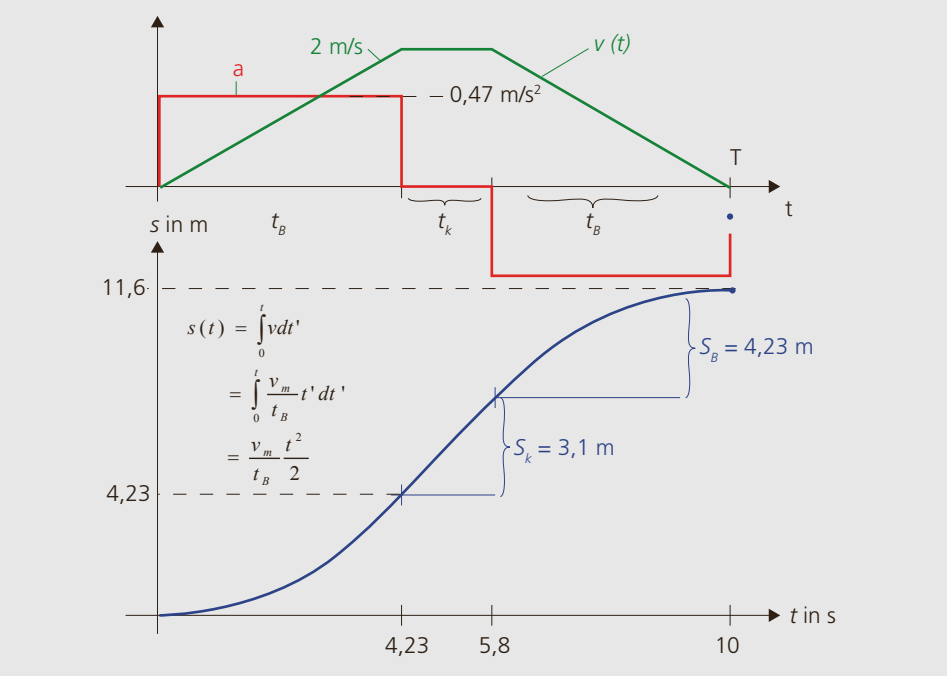


Figure 2.3: Résultat des courbes d'accélération, de vitesse et de déplacement en fonction du temps (Exercice 2.4).

3. Machines électriques

3.1 Loi de l'induction

a. La bobine avec un nombre de spires N_I est parcourue par un courant continu. Par conséquent, le flux magnétique ϕ est constant; Il n'y a alors pas de tension induite de transformation. Dans la bobine carrée avec un nombre de spires N_U uniquement une tension induite de mouvement apparaîtra lorsque le flux couplé avec la surface de la bobine changera. Ce sera le cas, dès que la boucle formée de conducteurs dépasse le bord de l'entrefer. Une fois que la boucle sort de l'entrefer, la tension induite de mouvement redevient nulle.

Il y a trois différents temps à considérer: $0..t_a$, $t_a..t_a+t_b$, $>t_a+t_b$. Comme la vitesse est constante, la tension induite entre les temps $t_a..t_a+t_b$ est aussi constante. La figure 3.1 montre le comportement de la tension.

Les durées pour le déplacement t_a et le déplacement t_b se calculent avec l'aide de la longueur *a* et *b* ainsi que la vitesse de déplacement de la boucle carrée:

$$t_a = \frac{a}{v} = \frac{15\cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}}{1\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} = \underline{15\mathrm{ms}} \quad \text{et} \quad t_b = \frac{b}{v} = \frac{20\cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}}{1\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} = \underline{20\mathrm{ms}}$$

Avec l'aide de la loi d'induction, la tension induite durant le temps t_b se calcule comme suit:

$$u_{12} = N_U \cdot \frac{d}{dt}\phi(t) = 5\cdot\frac{-0{,}36\mathrm{mVs}}{0{,}02\mathrm{s}} = -90\mathrm{mV} \rightarrow u_i = \underline{90\mathrm{mV}}$$

b. Le flux à partir du temps t_a diminue. Par conséquent la tension u_{12} est négative et u_i positive.

c. Le nombre de spires est donné par le quotient du potentiel magnétique (solénation) et le courant qui circule dans le conducteur $N=\Theta/I$. Le potentiel magnétique nécessaire est composé des potentiels de l'entrefer et de la longueur de la partie ferromagnétique.

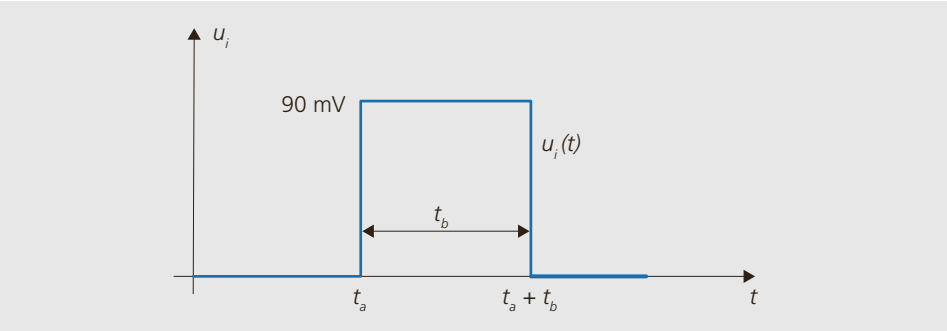


Figure 3.1: Comportement de la tension induite pour les trois zones (Exercice 3.1).

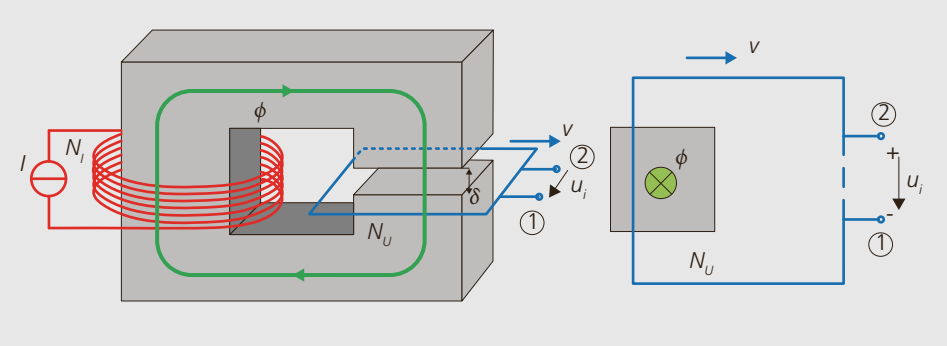


Figure 3.2: Polarité de la tension induite (Exercice 3.1).

Avec $A_\delta = A_{Fe}$ il s'ensuit aussi $B_\delta = B_{Fe}$ puisque le flux est constant :

$$\Theta = \Theta_\delta + \Theta_{Fe} = H_\delta \cdot \delta + H_{Fe} \cdot l_{Fe} = \frac{B}{\mu_0}\left(\delta + \frac{l_{Fe}}{\mu_r}\right)$$

avec: $B = B_\delta = B_{Fe} = \frac{\phi}{A_\delta} = \frac{0{,}36\text{mVs}}{4 \cdot 10^{-4}\text{m}^2} = 0{,}9\text{T}$

$$\rightarrow \Theta = \frac{0{,}9\text{T}}{4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{\text{Vs}}{\text{Am}}}\left(0{,}001\text{m} + \frac{0{,}3\text{m}}{1000}\right) = 716\text{A} + 215\text{A} = \underline{931\text{A}}$$

et ainsi: $N = \frac{\Theta}{I} = \frac{931\text{A}}{3\text{A}} = 310\text{Wdg}$

Si l'entrefer est doublé la partie du potentiel magnétique associé à l'entrefer doit aussi être doublé :

$$\Theta_{nouveau} = 2\Theta_\delta + \Theta_{Fe} = 2 \cdot 716\text{A} + 215\text{A} = \underline{1647\text{A}}$$

$$I = \frac{\Theta}{N} = \frac{1647\text{A}}{310\text{Wdg}} = \underline{5{,}31\text{A}}$$

d. Le sens du courant est obtenu par la direction du flux magnétique, comme présenté à la figure 3.3.

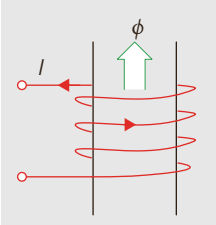


Figure 3.3: Sens correct du flux par rapport au courant (Exercice 3.1).

3.2 Machine à courant continu

a. La puissance est le produit du couple nominal M_N et de la vitesse de rotation Ω :

$$P_N = M_N \cdot \Omega \rightarrow M_N = \frac{P_N}{\Omega}, \text{ avec } \Omega = \frac{2\pi \cdot n_N}{60}$$

$$\rightarrow M_N = \frac{60 \cdot P_N}{2\pi \cdot n_N} = \frac{60 \cdot 4\text{W}}{2\pi \cdot 12\,000\,\text{rpm}} = 3{,}18\text{mNm}$$

La constante de couple k_T correspond à la constante de la machine $k\phi$ et peut être calculée comme suit :

$$k_T = k\phi = \frac{M_N}{I_{AN}} \rightarrow k_T = \frac{3{,}18\text{mNm}}{0{,}5\text{A}} = \underline{6{,}37\,\frac{\text{mNm}}{\text{A}}} \quad (=6{,}37\,\text{mVs})$$

b. La tension induite au point de fonctionnement est le produit de la constante de la machine et de la vitesse de rotation :

$$U_i = k\phi \cdot \Omega = k\phi \cdot \frac{2\pi \cdot n_N}{60} \rightarrow U_i = 6{,}37\text{mVs} \cdot \frac{2\pi \cdot 1200\text{ rpm}}{60} = \underline{8\text{V}}$$

La résistance d'induit R_A se calcule comme suit lors d'un fonctionnement stationnaire :

$$U_A = R_A \cdot I_A + U_i \rightarrow R_A = \frac{U_A - U_i}{I_A} = \frac{12\text{V} - 8\text{V}}{0{,}5\text{A}} = \underline{8\Omega}$$

c. le rendement η de la machine au point de fonctionnement mesuré est le rapport entre la puissance mesurée P_N et la puissance d'entrée P_1 :

$$\eta = \frac{P_N}{P_1} = \frac{P_N}{U_{AN} \cdot I_{AN}} = \frac{4\text{W}}{12\text{V} \cdot 0{,}5\text{A}} = \underline{66{,}7\%}$$

d. Pour créer la caractéristique statique, la vitesse de rotation n_0 à vide et le couple de démarrage M_0 doivent être calculés :

$$n_0 = \frac{60 \cdot \Omega_0}{2\pi} = \frac{60 \cdot U_A}{2\pi \cdot k\phi} = \frac{60 \cdot 12\text{V}}{2\pi \cdot 6{,}37\,\text{mVs}} = \underline{18000\,\text{rpm}}$$

$$M_0 = k\phi \cdot I_{A0} = k\phi \cdot \frac{U_A}{R_A} = 6{,}37\text{mVs} \cdot \frac{12\text{V}}{8\Omega} = \underline{9{,}56\text{mNm}}$$

L'intersection des 2 valeurs n_0 et M_0 sur les axes donne la caractéristique statique de la figure 3.4.

e. Le courant de démarrage est limité par la tension de l'induit et par la résistance de l'induit :

$$I_{A0} = \frac{U_A}{R_A} = \frac{12\text{V}}{8\Omega} = \underline{1{,}5\text{A}}$$

f. La tension de l'induit est composée de $U_A = U_{RA} + U_i$.
Les différentes grandeurs valent :

$$U_{RA} = I_A \cdot R_A, \text{ avec } I_A = \frac{M}{k\phi} = \frac{2\text{mNm}}{6{,}37\,\text{mVs}} = 0{,}31\text{A}$$

$$\rightarrow U_{RA} = 0{,}31\text{A} \cdot 8\Omega = \underline{2{,}5\text{V}}$$

$$U_i = k\phi \cdot \Omega = k\phi \cdot \frac{2\pi \cdot n_{0_nouveau}}{60} = 6{,}37\text{mVs} \cdot \frac{2\pi \cdot 6000\,\text{rpm}}{60} = \underline{4\text{V}}$$

$$\rightarrow U_A = 2{,}5\text{V} + 4\text{V} = \underline{6{,}5\text{V}}$$

Les points de fonctionnement pour la caractéristique statique sont :

$$I_{A0} = \frac{U_A}{R_A} = \frac{6{,}5\text{V}}{8\Omega} = \underline{0{,}81\text{A}}\,;\; M_0 = k\phi \cdot I_{A0} = 6{,}37\,\text{mVs} \cdot 0{,}81\text{A} = \underline{5{,}2\text{mNm}}$$

La vitesse de rotation à vide avec la nouvelle tension d'induit $U_{A_nouveau}$ peut être directement calculée en utilisant le rapport entre la nouvelle tension d'induit et la valeur initiale :

$$n_0 = 18000\frac{\text{r}}{\text{min}} \cdot \frac{U_{A_nouveau}}{U_A} = 18000\frac{\text{r}}{\text{min}} \cdot \frac{6{,}5\text{V}}{12\text{V}} = \underline{9750\,\text{rpm}}$$

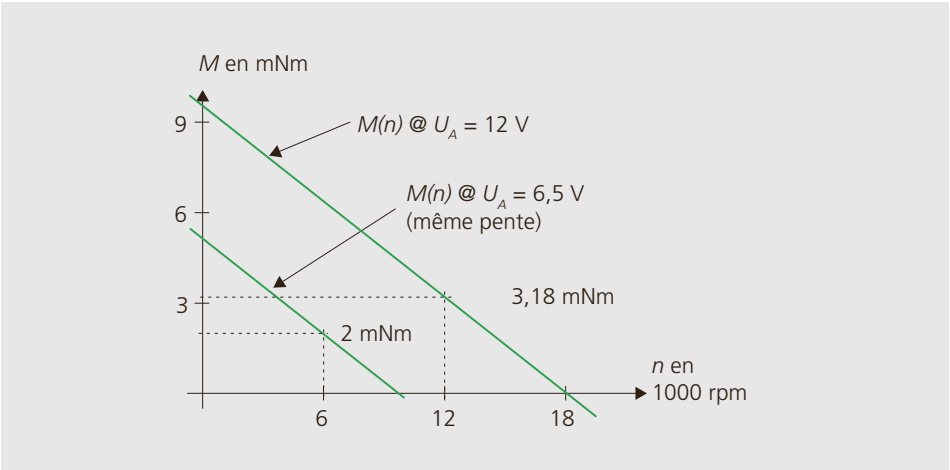


Figure 3.4: Caractéristique couple-vitesse pour 12 et 6,5 V (Exercice 3.2).

La nouvelle caractéristique statique a la même pente que la caractéristique 12 V, puisque la constante de la machine $k\phi$ entre le fonctionnement à vide et à couple maximum reste contant.
Le rendement de la machine au point de mesure est le rapport entre la puissance mécanique P_{Mech} et la puissance d'entrée P_1 :

$$\eta = \frac{P_{Mech}}{P_1} = \frac{P_{Mech}}{U_{AN_nouveau} \cdot I_{AN_nouveau}}$$

$$P_{Mech} = M \cdot \Omega_{0_nouveau} = M \cdot \frac{2\pi \cdot n_{0_nouveau}}{60} = 2\text{mNm} \cdot \frac{2\pi \cdot 6000\text{ rpm}}{60} = \underline{1{,}26\text{W}}$$

$$\rightarrow \eta = \frac{1{,}26\text{W}}{6{,}5\text{V} \cdot 0{,}31\text{A}} = \underline{62{,}5\%}$$

3.3 Calcul transformateur

a. La façon la plus simple de calculer le nombre de spires est d'utiliser la formule du transformateur :

$$U_{i(eff)} = \frac{1}{\sqrt{2}} N A_{Fe} 2\pi f \hat{B} = 4{,}44 f N A_{Fe} \hat{B}$$

En isolant le nombre de spires, il en résulte :

$$N_1 = \frac{U_{i(eff)}}{4{,}44 f N A_{Fe} \hat{B}} = \frac{400\text{ V}}{4{,}44 \cdot 50 \frac{1}{\text{s}} \cdot 0{,}1\text{ m}^2 \cdot 1{,}4 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}} = \underline{129\text{ Spires}}$$

Il est à noter que le nombre de spires est un nombre entier !

b. La puissance apparente pour un transformateur monophasé vaut S= U·I et le courant correspondant est :

$$I_1 = \frac{S}{U} = \frac{10\text{ kVA}}{400\text{ V}} = \underline{25\text{ A}}$$

La surface du cuivre est calculée à partir du courant circulant et de la densité de courant admissible :

$$A_{Cu,1} = \frac{I}{J} = \frac{25\text{ A}}{2\text{ A/mm}^2} = \underline{12{,}5\text{ mm}^2}$$

c. La longueur du fil de cuivre est directement donnée par le produit du nombre de spires et par la longueur moyenne d'une spire :

$$l_{Cu,1} = N_1 \cdot l_{Cu}/Spire = 129 \cdot 0{,}7\text{ m} = \underline{90{,}3\text{ m}}$$

Pour la résistance ohmique, il s'en suit :

$$R_1 = \rho \frac{l_{Cu}}{A_{Cu}} = 0{,}0175 \frac{\Omega\text{ mm}^2}{\text{m}} \frac{90{,}3\text{ m}}{12{,}5\text{mm}^2} = \underline{126\text{ m}\Omega}$$

d. Si la densité de courant du côté primaire et du côté secondaire est choisie identique, les pertes dans les deux enroulements seront égales. Les pertes par enroulement valent :

$$P_{V,Cu,1} = R \cdot I^2 = 126\text{ m}\Omega \cdot 25\text{ A}^2 = \underline{78{,}8\text{ W}}$$

et pour les pertes totales du primaire et du secondaire :

$$P_{V,Cu} = \underline{158\text{ W}}$$

e. Les pertes fer sont estimées en utilisant le poids du fer. Le volume est approximé par la multiplication de la surface du fer et de la longueur du chemin dans le fer, ainsi le poids vaut :

$m = V_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = 0{,}01\ \mathrm{m}^2 \cdot 1{,}0\,\mathrm{m} \cdot 7700\,\mathrm{kg/m}^3 = \underline{77\ \mathrm{kg}}$

$P_{V,Fe} = m_{Fe} \cdot V_{15} = 77\ \mathrm{kg} \cdot 3\,\mathrm{W/kg} = \underline{231\,\mathrm{W}}$

f. Finalement pour le rendement, il en résulte:

$$\eta = \frac{P_1 - P_{V,Cu} - P_{V,Fe}}{P_1} = \frac{10\,000\ \mathrm{W} \cdot 0{,}9 - 158\ \mathrm{W} - 231\ \mathrm{W}}{10\,000\ \mathrm{W} \cdot 0{,}9} = \frac{8611\,\mathrm{W}}{9000\,\mathrm{W}} = \underline{95{,}7\,\%}$$

3.4 Machine asynchrone à rotor en court-circuit

a. On a :

$P_{el} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos(\varphi)_N = \sqrt{3} \cdot 400\mathrm{V} \cdot 10{,}0\mathrm{A} \cdot 0{,}87 = \underline{6{,}03\mathrm{kW}}$

$$\eta = \frac{P_N}{P_{el}} = \frac{5{,}5\mathrm{kW}}{6{,}03\mathrm{kW}} = \underline{91{,}2\,\%}$$

b. En fonctionnement à vide, le glissement est nul et aucun courant ne circule dans le rotor : $I_R = 0$. Pour ce fonctionnement, le schéma équivalent est donné à la figure 3.5. Le courant d'entrée par phase pour un couplage triangle vaut :

$$I_S = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{2{,}3\mathrm{A}}{\sqrt{3}} = 1{,}33\mathrm{A}$$

Les pertes ohmiques au stator $P_{V,S}$ dans les trois phases de la machine valent:

$P_{V,S} = 3 \cdot I_S{}^2 \cdot R_S = 3 \cdot (1{,}33\mathrm{A})^2 \cdot 2{,}1\Omega = \underline{11{,}1\mathrm{W}}$

Les pertes fer P_{Fe} sont calculées en soustrayant de la puissance à vide (total des pertes) $P_{el,L}$ les pertes ohmiques au stator $P_{V,S}$.

$P_{Fe} = P_{el,L} - P_{V,S} = 60\mathrm{W} - 11{,}1\mathrm{W} = \underline{48{,}9\,\mathrm{W}}$

Au point de fonctionnement nominal le courant nominal I_N est de 10,0 A. De là il s'ensuit :

$$P_{V,S} = 3 \cdot (\frac{I_N}{\sqrt{3}})^2 \cdot R_S = 3 \cdot (\frac{10{,}0\mathrm{A}}{\sqrt{3}})^2 \cdot R_S = 3 \cdot (5{,}77\mathrm{A})^2 \cdot 2{,}1\,\Omega = 210\,\mathrm{W}$$

L'impédance Z_1 est bien plus grande que la résistance statorique R_1 :

$$Z_1 = \frac{U_1}{\frac{I_N}{\sqrt{3}}} = \frac{400\mathrm{V} \cdot \sqrt{3}}{10{,}0\mathrm{A}} = 69\,\Omega >> R_S = 2{,}1\,\Omega$$

Par conséquent, la chute de tension sur la résistance statorique R_1 est beaucoup plus petite que la tension d'entrée U_1 et ainsi les pertes fer peuvent être assumées indépendantes de la charge de la machine.

$$\Delta U_{R,S} = R_S \cdot \frac{I_N}{\sqrt{3}} = 2{,}1\Omega \cdot \frac{I_N}{\sqrt{3}} = 2{,}1\Omega \cdot \frac{10{,}0\mathrm{A}}{\sqrt{3}} = 12{,}1\mathrm{V} << U_1 = 400\mathrm{V}$$

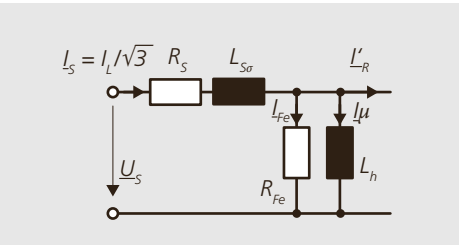


Figure 3.5: Schéma équivalent d'une phase pour un fonctionnement à vide (Exercice 3.4).

c. Le nombre de paires de pôles de la machine peut être calculé avec la relation $n_S = f_S / p \cdot 60$.
La vitesse de rotation nominale n_N vaut 1430 rpm. Le glissement se situe en règle générale entre 2..10 %. Si l'on suppose une vitesse de rotation synchrone de 1500 rpm, une diminution de 10 % de la vitesse signifie une vitesse de rotation de 1350 rpm. Comme la vitesse de rotation nominale n_N est entre ces deux valeurs il s'ensuit un nombre de paires de pôles de 2.
d. Le glissement vaut :

$$s = \frac{n_S - n_0}{n_S} = \frac{1500 - 1430}{1500} = \underline{4{,}7\%}$$

La puissance d'entrefer P_δ se calcule en soustrayant de la puissance d'entrée P_{el} les pertes ohmiques $P_{V,S}$ et les pertes fer P_{Fe} :

$$P_\delta = P_{el} - P_{V,S} - P_{Fe} = 6{,}03\text{kW} - 210\,\text{W} - 48{,}9\text{W} = \underline{5771\,\text{W}}$$

Les pertes rotoriques sont proportionnelles au glissement :

$$P_\delta = 3 \cdot \frac{R_R'}{s} \cdot (I_R')^2 \;\rightarrow\; s \cdot P_\delta = 3 \cdot R_R' \cdot (I_R')^2 = P_{V,R}$$

$$\rightarrow\; P_{V,R} = s \cdot P_\delta = 0{,}047 \cdot 5771\,\text{W} = \underline{271\,\text{W}}$$

3.5 Identification d'une pompe

a. La machine étant connectée en triangle, la valeur de la résistance totale vaut $R_\Delta = 2/3\, R_S$ et par conséquent :

$$R_S = \frac{3}{2} \cdot R_\Delta = \frac{3}{2} \cdot 30\text{m}\Omega = \underline{45\text{m}\Omega}$$

La pratique montre que la réactance de champ principal X_h de la figure 3.6 et que la résistance des pertes fer R_{Fe} sont beaucoup plus grandes que les autres impédances du modèle.
Il en résulte que lors de **l'essai en court-circuit** le schéma simplifié de la figure 3.7 peut être utilisé.
La puissance P_k se répartit entre les pertes par effet Joules au stator et la puissance d'entrefer :

$$P_k = P_{V,S} + P_\delta$$

$$P_k = 3 \cdot R_S \cdot I_S^2 + 3 \cdot \frac{R'_R}{s} \cdot I'^2_R, \text{ avec } s = 1 \text{ et } I_S = I'_R$$

$$P_k = 3 \cdot (R_S + R'_R) \cdot I_S^2 \text{ avec } I_S = I_{L,k} / \sqrt{3}$$

$$\rightarrow\; R'_R = \frac{P_k}{3 \cdot I_S^2} - R_S = \frac{5{,}6\text{kW}}{3 \cdot \left(220\text{A}/\sqrt{3}\right)^2} - 45\text{m}\Omega = 115\,\text{m}\Omega - 45\text{m}\Omega = \underline{70\text{m}\Omega}$$

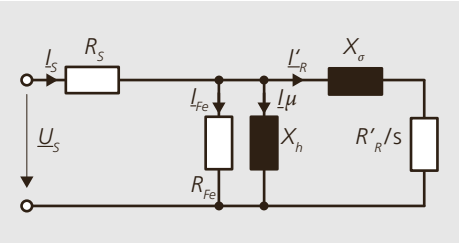


Figure 3.6: Schéma équivalent simplifié d'une phase de l'ASM avec les grandeurs recherchées (Exercice 3.5).

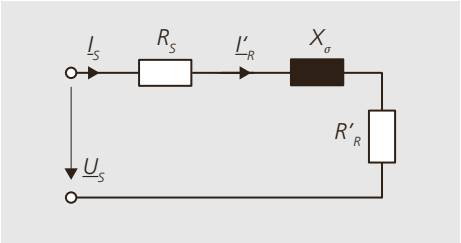


Figure 3.7: Schéma équivalent d'une phase en court-circuit (à l'arrêt s = 1) et simplification de la réactance de champ principal et de la résistance fer (Exercice 3.5).

À **vide**, la branche rotorique de la figure 3.6 est supprimée puisque s → 0. La chute de tension sur R_S est négligeable par rapport à la tension appliquée et par conséquent la pleine tension est aux bornes de la résistance fer.

$$P_{Fe} \approx 3\frac{U_{L,0}^{\ 2}}{R_{Fe}} = P_{S,0} - 3R_S\left(I_{L,0}/\sqrt{3}\right)^2 = 4{,}5\text{kW} - 3\cdot 45\text{m}\Omega\left(80\text{A}/\sqrt{3}\right)^2 = 4500\text{W} - 288\text{W} = 4212\text{ W}$$

$$R_{Fe} \approx \frac{U_{L,0}^{\ 2}}{P_{Fe}/3} = \frac{(400\text{V})^2}{4212\text{ W}/3} = \underline{114\ \Omega}$$

Une machine asynchrone, fonctionnant à vide, ne consomme approximativement que le courant magnétisant du réseau.

$$\cos\varphi \approx \frac{P_{S,0}}{\sqrt{3}U_{L,0}\,I_{L,0}} = \frac{4500\text{W}}{\sqrt{3}\cdot 400\text{V}\cdot 80\text{A}} = 0{,}081$$

La chute de tension aux bornes de la résistance et de l'inductance de fuite est petite par rapport à la tension sur l'inductance de champ principal. On peut alors la calculer comme suit :

$$X_h \approx \frac{U_{L,0}}{I_{L,0}/\sqrt{3}} = \frac{400\text{V}}{80\text{A}/\sqrt{3}} = \underline{8{,}66\Omega}$$

En se basant sur le schéma simplifié pour **l'essai en court-circuit** les relations suivantes sont applicables :

$$\frac{U_{L,k}}{I_{L,k}/\sqrt{3}} = \sqrt{(X_\sigma)^2 + (R_S + R'_R)^2} \quad \text{avec } X_\sigma = X_{S\sigma} + X_{R\sigma}$$

$$\rightarrow\ X_\sigma = \sqrt{\left(\frac{U_{L,k}}{I_{L,k}/\sqrt{3}}\right)^2 - (R_S + R'_R)^2} = \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{45\text{V}}{220\text{A}/\sqrt{3}}\right)^2 - (45\text{m}\Omega + 70\text{m}\Omega)^2}$$

$$X_\sigma = \sqrt{(354\text{m}\Omega)^2 - (115\text{m}\Omega)^2} = \underline{325\text{m}\Omega}$$

3.6 ASM avec une commande U/f

a. Le glissement nominal vaut

$$s_N = \frac{n_S - n_N}{n_S} = \frac{1500 - 1440}{1500} = \underline{4\%}$$

Le couple de décrochage M_K se calcule avec l'aide de la formule de Kloss, dans laquelle s_N et s_K sont donnés sous forme de rapport (figure 3.8) :

$$\frac{M}{M_K} = \frac{2}{\left(\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}\right)} \rightarrow M_K = \frac{1}{2}\cdot M\left(\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}\right), \text{ avec } M_K = M \text{ lorsque } s_K = s$$

Le couple nominal se déduit de la puissance nominale :

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega} = \frac{60\cdot P_{N,mech}}{2\pi\cdot n_N} = \frac{60\cdot 4{,}6\text{kW}}{2\pi\cdot 1440\frac{\text{r}}{\text{min}}} = 30{,}5\text{Nm}$$

$$M_K = \frac{1}{2}\cdot M_N\left(\frac{s_N}{s_K} + \frac{s_K}{s_N}\right) = \frac{1}{2}\cdot 30{,}5\text{Nm}\cdot\left(\frac{4}{25} + \frac{25}{4}\right) = 15{,}25\text{Nm}\cdot 6{,}41 = \underline{97{,}8\text{Nm}}$$

b.Une fois que la vitesse n dépasse la vitesse de base n_{eck}, le moteur se trouve en mode d'affaiblissement du champ. Dans cette zone, on a :

$$M_K = \frac{3 \cdot U_S^2}{4\pi f_S \cdot \omega_S \cdot L_\sigma} = \frac{3 \cdot U_S^2}{4\pi f_S \cdot 2\pi f_S \cdot L_\sigma} = \frac{1}{f_S^2} \cdot \frac{3 \cdot U_S^2}{4\pi \cdot 2\pi \cdot L_\sigma} \propto \frac{1}{f_S^2}$$

Le couple de décrochage en fonction de la fréquence statorique f_S au-delà de la vitesse de base n_{eck} est proportionnel à $1/f_S^2$. Si le couple M doit être maintenu constant au-delà du coude de la courbe n_{eck} il y aura une intersection à la vitesse de rotation correspondante à $f_{S,max,MN}$. La figure 3.8 montre que les deux courbes se croisent et qu'à ce point de fonctionnement $M_{KN} = M_N$.
$Ü$ signifie la capacité de surcharge (Überlastbarkeit) : $M_K = Ü \cdot M_N$.
Pour la zone de fonctionnement ($f_S < f_{S,eck}$) :

$$Ü = \frac{M_K}{M_N} = \frac{97{,}8\text{Nm}}{30{,}5\text{Nm}} = 3{,}2$$

Puisque le couple de décrochage M_K diminue avec l'augmentation de la fréquence suivant $1/f^2$ l'équation suivante peut être utilisée:

$$M_K = M_{KN} \cdot \left(\frac{f_{S,eck}}{f_S}\right)^2 = M_N \text{ pour la fréquence } f_{S,max,MN}$$

$$\rightarrow f_{S,\max,MN} = \sqrt{\frac{M_{KN}}{M_N}} \cdot f_{S,eck} = \sqrt{Ü} \cdot f_{S,eck} = \sqrt{3{,}2} \cdot 50\text{Hz} = \underline{90\text{Hz}}$$

À la fréquence statorique maximale $f_{S,max,MN}$ on a $M = M_K = M_N$ et par conséquent aussi $s = s_k$.
La vitesse de rotation $n_{max,MN}$ à la fréquence statorique maximale $f_{S,max,MN}$ peut être déterminée avec la relation suivante :

$$n_{\max,MN} = n_{0,\max,MN} \cdot (1 - s_{k,\max,MN}), \text{ avec } n_{0,\max,MN} = \frac{60 \cdot f_{S,\max,MN}}{p}$$

Le glissement de décrochage pour une fréquence donnée f_s située au-delà du coude de la courbe vaut :

$$s_K \approx \frac{R_R'}{\omega_S \cdot L_\sigma} = \frac{f_{S,eck}}{f_S} \frac{R_R'}{\omega_{S,eck} \cdot L_\sigma} = \frac{f_{eck}}{f_{S,\max}} s_{K,eck} \rightarrow s_{K,\max,PN} = 0{,}25 \cdot \frac{50\text{Hz}}{90\text{Hz}} = \underline{0{,}1}$$

$$\rightarrow n_{\max,MN} = \frac{60 \cdot 90\text{Hz}}{2} \cdot (1 - 0{,}139) = \underline{2325 \text{ rpm}}$$

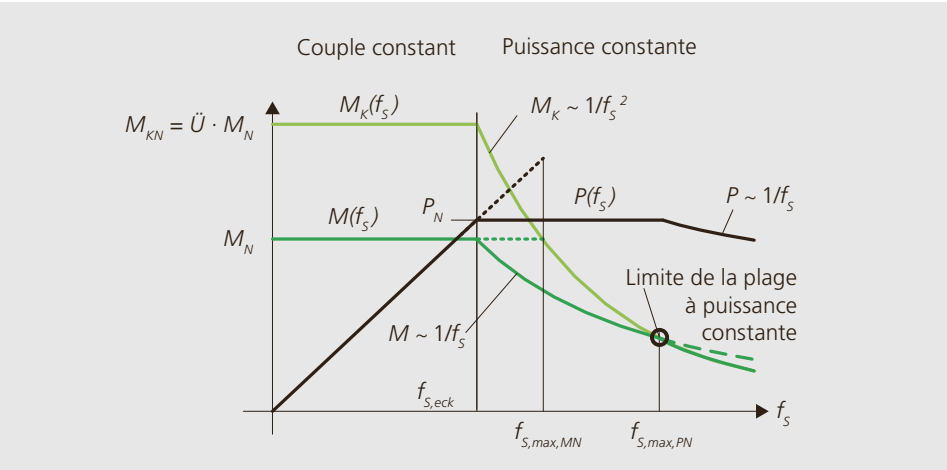


Figure 3.8: Caractéristique statique de couple avec fonctionnement en affaiblissement du champ.

Un calcul similaire peut être effectué avec comme condition une puissance constante durant la zone d'affaiblissement du flux.
Dans ce cas $f_{S,max,PN} = \ddot{U} \cdot f_{s,eck}$.

3.7 Machine synchrone sur le réseau

a. La vitesse de rotation nominale n_N est :

$$n_N = \frac{60 \cdot f_S}{p} = \frac{60 \cdot 50\text{Hz}}{2} = \underline{1500\,\text{rpm}}$$

b. Le couple de décrochage vaut :

$$M_K = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{U_N}{n_N/60} \cdot \frac{U_P}{X_d} = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{60 \cdot 400\text{V}}{1500\,\text{rpm}} \cdot \frac{400\text{V}}{2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 0{,}01\text{H}} = \underline{973\,\text{Nm}}$$

Avec l'angle de charge donné au point de fonctionnement nominal, on a (figure 3.9) :

$$M_N = -M_K \cdot \sin(\vartheta) = -973\text{Nm} \cdot \sin(20°) = \underline{-333\text{N}}$$

c. Pour la vitesse nominale, la puissance vaut:

$$P_N = \Omega \cdot M_N = \frac{2\pi \cdot 1500\,\text{rpm}}{60} \cdot -333\text{Nm} = \underline{-52{,}3\text{kW}}$$

d. À vide, les amplitudes et les phases des tensions aux bornes de la machine $\underline{U}_N$ et les tensions induites $\underline{U}_P$ sont égales :

$$I_0 = \frac{\underline{U}_N - \underline{U}_P}{jX_d} = 0\text{A}$$

La réactance synchrone vaut : $X_S = 2\pi f_S L_S = 2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 10\text{mH} = 3{,}14\Omega$

Au point de fonctionnement nominal :

$$\underline{I}_S = \frac{\underline{U}_N - \underline{U}_P}{jX_S} = \frac{400\text{V} - 400\text{V}\, e^{j\frac{20}{180}\pi}}{j\,3{,}14\Omega} = \frac{(24 - j137)\text{V}}{j\,3{,}14\Omega} = (-7{,}7 - j43{,}6)\text{A} = 44{,}2\text{A}\; e^{-j\frac{170}{180}\pi}$$

$$I_N = \sqrt{3} I_S = \sqrt{3} \cdot 44{,}2A = \underline{76{,}6\text{A}}$$

La différence des tensions peut aussi être trouvée par trigonométrie (figure 3.9, la hauteur du triangle est perpendiculaire à «delta» U).

$$\Delta U = \sqrt{(U_S - U_P \cdot \cos(\vartheta))^2 + (U_P \cdot \sin(\vartheta))^2}$$

$$\Delta U = \sqrt{(400\text{V} - 400\text{V} \cdot \cos(20°))^2 + (400\text{V} \cdot \sin(20°))^2} = \sqrt{(24{,}1\text{V})^2 + (137\text{V})^2} = \underline{139\text{V}}$$

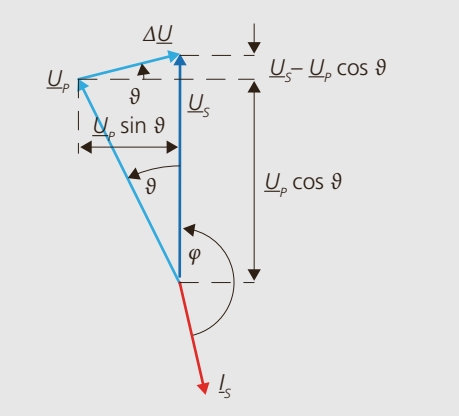


Figure 3.9: Phaseurs pour le fonctionnement au point nominal avec ϑ=20° (Exercice 3.7).

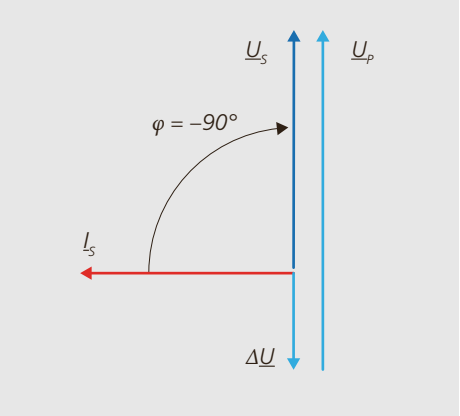


Figure 3.10: Phaseurs pour un fonctionnement purement capacitif avec le courant en avance de 90° (Exercice 3.7).

e. Quand la puissance réactive est fournie au réseau, la machine est dans un mode de fonctionnement capacitif. Étant donné qu'aucune puissance active n'est convertie, l'angle de charge est nul et les tensions $\underline{U}_S$ et $\underline{U}_P$ sont en phases. Ceci est représenté à la figure 3.10.
La différence des tensions est déterminée par trigonométrie.

$$\underline{U}_P = U_S - \Delta\underline{U} \rightarrow U_P = U_S + |\Delta U|, \text{ avec } \Delta U = X_S \cdot I_S$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \sin(\varphi) = 3 \cdot U_S \cdot I_S \cdot \sin(\varphi) = 3 \cdot U_S \cdot I_S \cdot \sin(90°) = 3 \cdot U_S \cdot I_S$$

$$\rightarrow I_S = \frac{Q}{3 \cdot U_S} = \frac{20\text{kvar}}{3 \cdot 400\text{V}} = 16{,}7\text{A}$$

$$\rightarrow \Delta U = 3{,}14\Omega \cdot 16{,}7\text{A} = 52{,}3\text{V}$$

$$\rightarrow U_P = 400\text{V} + 52{,}3\text{V} = \underline{452\text{V}}$$

3.8 Machine synchrone à aimants permanents

a. Le courant I_N est dépendant du couple et de la constante de couple :

$$M_N = k_T \cdot I_N \rightarrow I_N = \frac{M_N}{k_T} = \frac{1{,}4\text{Nm}}{1{,}46\text{Nm/A}} = \underline{0{,}959\text{A}}$$

Si un couplage étoile était utilisé, la résistance de phase vaudrait $R_S = R_{2Ph}/2$:

$$P_{VS,N} = 3 \cdot \frac{R_{2Ph}}{2} \cdot (I_N)^2 = 3 \cdot \frac{32{,}3\Omega}{2} \cdot (0{,}959\text{A})^2 = \underline{44{,}6\text{W}}$$

Si le couplage était en triangle, la résistance mesurée entre les bornes de la machine serait de

$$R_{2Ph} = \frac{R_S \cdot 2R_S}{3R_S}$$ et par conséquent la résistance de phase vaut

$$R_S = \frac{3}{2} R_{2Ph}$$

De la figure 3.11, les pertes se calculent comme suit :

$$P_{VS,N} = 3 \cdot \frac{3}{2} R_{2Ph} \cdot \left(\frac{I_N}{\sqrt{3}}\right)^2 = 3 \cdot \frac{3}{2} \cdot 32{,}3\Omega \cdot \left(\frac{0{,}959\text{A}}{\sqrt{3}}\right)^2 = \underline{44{,}6\text{W}}$$

ce qui représente le même résultat que pour le couplage en étoile. Le couplage ne joue, dans ce cas, aucun rôle sur les calculs

b. La puissance de la machine se calcule avec la constante de couple, le courant et la vitesse de rotation ou avec la tension induite et le courant. Dans ce cas, comme le courant est uniquement sur l'axe-q, U_p et I_N sont en phase (figure 3.12). En supposant un couplage en étoile, il vient :

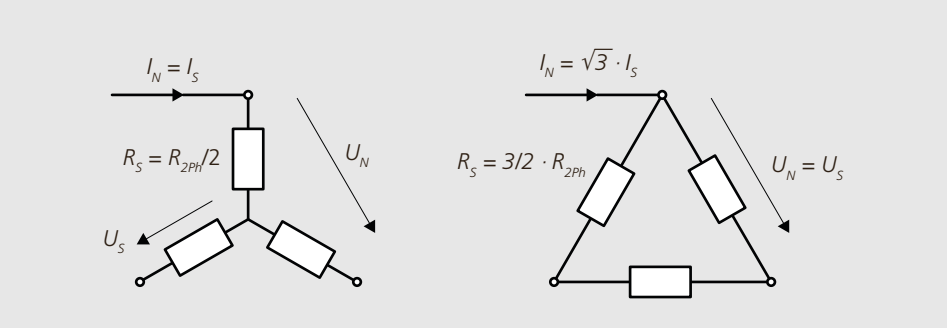


Figure 3.11: Comparaison des couplages pour le calcul des pertes cuivre au stator (Exercice 3.8).

$$P = M \cdot \Omega = k_T I_N \frac{2\pi}{60} n = 3 U_P I_N \text{ et ainsi } U_P = \frac{k_T}{3} \frac{2\pi}{60} n$$

Pour ces conditions de couplage, la tension à appliquer est de $U_N = \sqrt{3}\, U_S$. Si le moteur était connecté en triangle, les valeurs de résistances et d'impédances sous a) devraient être utilisées comme grandeurs de phase. La tension à appliquer est alors la même que la tension de phase. La valeur résultante est alors de nouveau indépendante du couplage.

Pour le couplage en étoile, les différentes composantes de la tension sont :

$$U_P = \frac{k_T}{3} \frac{2\pi}{60} \cdot n = \frac{1{,}46\,\text{Nm/A}}{3} \cdot \frac{2\pi}{60} 4500 \frac{\text{r}}{\text{min}} = 230\,\text{V}$$

$$U_R = I_N \frac{R_{2Ph}}{2} = 0{,}959\,\text{A} \cdot \frac{32{,}3\Omega}{2} = 15{,}5\,\text{V}$$

Pour le calcul de U_X la valeur correspondante de la fréquence doit être calculée :

$$f_S = \frac{n}{60} p = \frac{4500\,\text{rpm}}{60}\ 2 = 150\,\text{Hz}$$

$$U_X = X_S \cdot I_N = \omega_S \cdot \frac{L_{2Ph}}{2} I_N = 2\pi \cdot f_S \frac{L_{2Ph}}{2} I_N = 34{,}4\Omega \cdot 0{,}959\,\text{A} = 33{,}0\,\text{V}$$

La tension de phase en se basant sur la figure 3.12 est :

$$U_S = \sqrt{(U_R + U_P)^2 + U_X^2} = \sqrt{(15{,}5\,\text{V} + 230\,\text{V})^2 + (33\,\text{V})^2} = 248\,\text{V}$$

La tension requise aux bornes de la machine est :

$$U_N = \sqrt{3} \cdot 248\,\text{V} = \underline{429\,\text{V}}$$

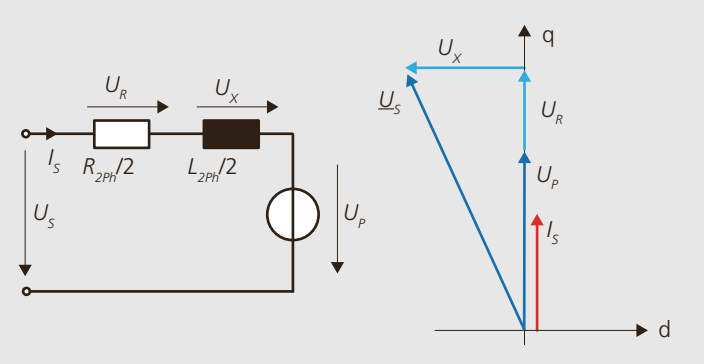


Figure 3.12: Schéma équivalent d'une phase pour un couplage étoile et diagramme des phaseurs avec IS purement sur l'axe-q (Exercice 3.8).

4. Electronique de puissance

4.1 Redresseur à diodes

a. Le condensateur se charge jusqu'à la valeur de crête de la tension du réseau :

$$\hat{u}_d = \hat{u}_{UV} = 115\,\text{V}\sqrt{2} = \underline{162{,}6\,\text{V}}$$

b. La valeur moyenne de la tension pour un redresseur à diodes triphasé sans capacité de lissage vaut :

$$\bar{u}_d = U_d = 1{,}35 U_{UV} = 1{,}35 \cdot 115\,\text{V} = \underline{155{,}3\,\text{V}}$$

Par conséquent une tension dépendante de la charge va s'établir entre la valeur moyenne et la valeur de crête: $\underline{\bar{u}_d \leq u_d \leq \hat{u}_d}$.

c. L'ondulation de tension du circuit intermédiaire a une fréquence égale à 6 fois celle du réseau :

$$f_d = 6 f_N = 6 \cdot 400\,\text{Hz} = \underline{2{,}4\,\text{kHz}}$$

Il apparaît ainsi les fréquences f_d et ses multiples. Les 4 premières sont: 2,4 kHz; 4,8 kHz; 7,2 kHz et 9,6 kHz.

d. Augmenter l'impédance du réseau L_S en introduisant d'autres inductances.

4.2 Pertes dans un pont à diodes

a. La puissance du circuit intermédiaire est donnée en fonction de la valeur moyenne du courant et de la tension du circuit intermédiaire :

$$P_d = U_d I_d \quad \Rightarrow \quad I_d = P_d / U_d = 10\,\text{kW}/540\,\text{V} = \underline{18{,}5\,\text{A}}$$

b. Chaque diode conduit le courant durant un tiers du temps et ainsi le courant moyen est égal à un tiers du courant du circuit intermédiaire :

$$\bar{i}_F = I_d / 3 = 18{,}5\,\text{A}/3 = \underline{6{,}17\,\text{A}}$$

c. Pour une chute de tension constante de 2 V par diode, les pertes par diode valent :

$$P_D = \bar{i}_F \cdot 2\,\text{V} = 6{,}17\,\text{A} \cdot 2\,\text{V} = \underline{12{,}4\,\text{W}}$$

d. La puissance consommée P_{cons} par le convertisseur correspond à la puissance du circuit intermédiaire P_d plus les pertes P_D de toutes les diodes. Ainsi le rendement η vaut :

$$P_{cons} = P_d + 6 P_D = 10\,\text{kW} + 6 \cdot 12{,}4\,\text{W} = \underline{10{,}07\,\text{kW}}$$

$$\Rightarrow \quad \eta = P_d / P_{cons} = 10\,\text{kW}/10{,}07\,\text{kW} = \underline{99{,}3\%}$$

4.3 Pont à Thyristor

a. La tension moyenne maximale est la même que pour un pont à diodes :

$$\bar{u} = U_{di0} = 1{,}35\, U_{UV} = 1{,}35 \cdot 173\,\text{V} = \underline{233{,}6\,\text{V}}$$

b. En fonction des angles de retard d'allumage il advient :

$$U_{di\alpha} = 1{,}35\, U_{UV} \cos(\alpha) = 233{,}6\,V \cos(60°) = \underline{116{,}8\,\text{V}}$$

c. Le déphasage du courant de ligne est égal à l'angle de retard d'allumage : $\alpha = 60°$

4.4 Convertisseur de tension monophasé avec charge résistive

a. Le filament d'une lampe à incandescence à 50 Hz peut être assumé comme purement résistif. La résistance peut être exprimée en fonction de la tension et de la puissance :

$$P = U^2/R \quad \Rightarrow \quad R = U^2/P = 230\,\mathrm{V}^2/75\,\mathrm{W} = \underline{705{,}3\Omega}$$

b. Tensions et puissances pour $\alpha = 30°$ et $\alpha = 90°$. On notera que les angles doivent être exprimés en radian dans la formule : $30° \mathrel{\hat{=}} \pi/6$ et $90° \mathrel{\hat{=}} \pi/2$

$$U_2 = U_1\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi}\sin(2\alpha)} \quad \Rightarrow \quad P = U^2/R$$

$$U_{2,\alpha=\pi/6} = 230\,\mathrm{V}\sqrt{1 - \frac{\pi/6}{\pi} + \frac{1}{2\pi}\sin(\pi/3)} = 230\,\mathrm{V}\cdot 0{,}986 = \underline{226{,}7\,\mathrm{V}}$$

$$P_{2,\alpha=\pi/6} = 226{,}7\,\mathrm{V}^2/705{,}3\Omega = \underline{72{,}8\,\mathrm{W}}$$

$$U_{2,\alpha=\pi/2} = 230\,\mathrm{V}\sqrt{1 - \frac{\pi/2}{\pi} + \frac{1}{2\pi}\sin(\pi)} = 230\,\mathrm{V}\cdot 0{,}707 = \underline{162{,}6\,\mathrm{V}}$$

$$P_{2,\alpha=\pi/2} = 162{,}6\,\mathrm{V}^2/705{,}3\Omega = \underline{37{,}5\,\mathrm{W}}$$

c. La valeur efficace du courant dans la charge qui est le rapport entre la tension de la charge et la résistance de charge, est égal au courant du réseau. De là, la puissance apparente peut être calculée :

$$I_{2,\alpha=\pi/6} = U_{2,\alpha=\pi/6}/R = 226{,}7\,\mathrm{V}/705{,}3\Omega = 0{,}321\ \mathrm{A}$$

$$S_{1,\alpha=\pi/6} = U_1 \cdot I_{2,\alpha=\pi/6} = 230\,\mathrm{V}\cdot 0{,}321\ \mathrm{A} = \underline{73{,}9\,\mathrm{VA}}$$

$$I_{2,\alpha=\pi/2} = U_{2,\alpha=\pi/2}/R = 162{,}6\,\mathrm{V}/705{,}3\Omega = 0{,}231\ \mathrm{A}$$

$$S_{1,\alpha=\pi/2} = U_1 \cdot I_{2,\alpha=\pi/2} = 230\,\mathrm{V}\cdot 0{,}231\ \mathrm{A} = \underline{53{,}0\,\mathrm{VA}}$$

d. Le facteur de puissance λ est le rapport entre les puissances active et réactive :

$$\lambda_{\alpha=\pi/6} = P_{\alpha=\pi/6}/S_{1,\alpha=\pi/6} = 72{,}8\,\mathrm{W}/73{,}9\,\mathrm{VA} = \underline{0{,}985}$$

$$\lambda_{\alpha=\pi/2} = P_{\alpha=\pi/2}/S_{1,\alpha=\pi/2} = 37{,}5\,\mathrm{W}/53{,}0\,\mathrm{VA} = \underline{0{,}708}$$

4.5 Hacheur abaisseur et pont monophasé (Pont en H)

a. La tension de sortie pour un niveau de modulation $m = 0{,}7$ vaut :

$$U_a = m \cdot U_d = 0{,}7 \cdot 300\,\mathrm{V} = \underline{210\,\mathrm{V}}$$

Pour le courant donné dans le semi-conducteur de $\hat{i}_{HL} = 20$ A la puissance pour ce point de fonctionnement est :

$$P_a = U_a \cdot \hat{i}_{HL} = 210\,\mathrm{V}\cdot 20\,\mathrm{A} = 4{,}2\,\mathrm{kW}$$

b. Pour un pont monophasé, la tension maximale sur la charge est égale à la tension du circuit intermédiaire et le courant est limité par le courant maximal du semi-conducteur :

$$|P_{\max}| = U_d \cdot \hat{i}_{HL} = 300\,\mathrm{V}\cdot 20\,\mathrm{A} = \underline{6\,\mathrm{kW}}$$

c. La valeur de crête de la tension est égale à la tension du circuit intermédiaire $U_d = 300$ V. Les valeurs efficaces de la fondamentale de courant et de tension sont égales à la valeur de crête divisée par racine de deux :

$$U = \hat{u}/\sqrt{2} = 300\,\mathrm{V}/\sqrt{2} = 212\,\mathrm{V}; \qquad I = \hat{i}/\sqrt{2} = 20\,\mathrm{A}/\sqrt{2} = \underline{14{,}1\,\mathrm{A}}$$

Pour un $\cos(\varphi) = 1$ la puissance active possible vaut $P = U \cdot I = 3$ kW.

d. Pour une tension constante du circuit intermédiaire, le courant fournit par la machine au circuit intermédiaire vaut :

$I_d = P/U_d = 2\text{kW}/300\text{V} = \underline{6{,}67\,\text{A}}$

Pour cette valeur de courant, un circuit de freinage doit être ajouté.

4.6 Pont triphasé autopiloté

a. La puissance maximale de sortie est obtenue avec le facteur de modulation maximal $M = 1{,}0$:

$\hat{u}_{UV} = \sqrt{3}\dfrac{U_d}{2} = \underline{467{,}7\,\text{V}}$ et $U_{UV} = \dfrac{\hat{u}_{UV}}{\sqrt{2}} = \underline{330{,}7\,\text{V}}$

b. Avec l'injection d'une troisième harmonique, c.-à-d. un facteur de modulation $M = 1{,}155$ la tension est augmentée comme suit :

$\hat{u}_{UV} = U_d = \underline{540\,\text{V}}$ et $U_{UV} = \dfrac{U_d}{\sqrt{2}} = \underline{381{,}8\,\text{V}}$

c. Pour un courant sinusoïdal d'amplitude de 100A, la valeur effective vaut.
Il en résulte une puissance apparente et active de : $I_{eff} = \hat{i}/\sqrt{2} = 100\,\text{A}/\sqrt{2} = \underline{70{,}7\,\text{A}}$.

Pour les puissances apparente et active, il en résulte ainsi :

$S = \sqrt{3}UI;$ $P = \sqrt{3}UI\cos(\varphi);$

$S_{M=1} = \sqrt{3}\cdot 330{,}7\text{V}70{,}7\text{ A} = \underline{40{,}5\,\text{kVA}};$ $P_{M=1} = 40{,}5\,\text{kVA}\cdot 0{,}8 = \underline{32{,}4\,\text{kW}}$

$S_{M=1{,}155} = \sqrt{3}\cdot 381{,}8\text{V}100\text{ A} = \underline{46{,}8\,\text{kVA}};$ $P_{M=1{,}155} = 46{,}8\,\text{kVA}\cdot 0{,}8 = \underline{37{,}4\,\text{kW}}$

d. La puissance du moteur directement connecté au réseau vaut :

$P = \sqrt{3}UI\cos(\varphi) = \sqrt{3}\cdot 400\text{V}\cdot 70{,}7\text{A}\cdot 0{,}8 = \underline{39{,}2\,\text{kW}}$

Dues aux chutes de tensions sur le redresseur à diodes et sur le convertisseur de sortie, la valeur de la tension à la sortie du convertisseur ne peut pas être égale à la tension du réseau. Il s'en suit une diminution de la puissance due au convertisseur.

4.7 Pertes dans un pont triphasé

a. Le courant circule toujours dans un semi-conducteur de puissance par branche. Pour les trois branches du convertisseur on a:

$P_L = 3u_F\cdot\bar{i}_F = 3\cdot 2\text{V}\cdot 9\text{ A} = \underline{54\text{W}}$

b. Les pertes de commutation dans les 6 semi-conducteurs à 10 kHz valent :

$P_S = 6f_S\cdot E_S = 6\cdot 10^4\cdot 0{,}8\text{ mW} = \underline{48\,\text{W}}$

c. En cas d'augmentation de la tension du circuit intermédiaire, les pertes par commutation augmentent proportionnellement à la tension. Les pertes par conduction restent identiques :

$P_{S,400\text{V}} = P_{S,300\text{V}}\,(400\text{V}/300\text{V}) = 48\text{W}\cdot 1{,}33 = \underline{64\text{W}}$

$P_{tot} = P_L + P_{S,400\text{V}} = 54\text{W} + 64\text{W} = \underline{118\,\text{W}}$

5. Entraînements électriques

5.1 Processus d'accélération

a. Le couple est calculé à l'aide de la puissance :

$$M_N = \frac{5500\text{W} \cdot 60}{1440\text{rpm} \cdot 2\pi} = 36{,}5\text{Nm}$$

La valeur moyenne approximative du couple, obtenue avec la caractéristique de couple de la figure 5.1 donne :

$$M_{M,AVG,1} \approx 1{,}6 \cdot M_N = 1{,}6 \cdot 36{,}5\text{Nm} \approx 58\text{Nm}$$

$$\dot{\Omega} = \frac{M_{M,AVG,1}}{J} = \frac{58\text{Nm}}{0{,}02\text{kgm}^2} = 2900\ \text{rad/s}^2$$

$$\rightarrow \dot{n}_1 = 2900\ \text{rad/s}^2 \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{60 \cdot s}{\text{min}} = 27700\ \frac{\text{rpm}}{\text{s}}$$

Jusqu'à la vitesse de synchronisme (qui est seulement atteinte approximativement) :

$$\Delta t = \frac{n_S}{\dot{n}_1} = \frac{1500\,\text{rpm}}{27700\,\frac{\text{rpm}}{\text{s}}} = \underline{54\text{ms}}$$

b. Jusqu'à 750 rpm : $M_{M,AVG,2} \approx 1{,}4 \cdot M_N$, ensuite :
$M_{M,AVG,3} \approx 1{,}8 \cdot M_N$

En couplage étoile, le couple est réduit d'un facteur 3 :

$$\dot{n}_2 = \dot{n}_1 \cdot \frac{1{,}4}{1{,}6 \cdot 3} = 8080\,\frac{\text{rpm}}{\text{s}}$$

Accélération jusqu'à 750 rpm : $\Delta t_2 = \frac{750\,\text{rpm}}{8080\,\frac{\text{rpm}}{\text{s}}} = 93\text{ms}$

Avec un couplage triangle :

$$\dot{n}_3 = \dot{n}_1 \cdot \frac{1{,}8}{1{,}6} = 31163\ \frac{\text{rpm}}{\text{s}} \rightarrow \Delta t_3 = \frac{750\,\text{rpm}}{31163\ \frac{\text{rpm}}{\text{s}}} = 24\text{ms}$$

Ce qui donne au total : $\Delta t_{2+3} = 93\text{ms} + 24\text{ms} = \underline{117\text{ms}}$

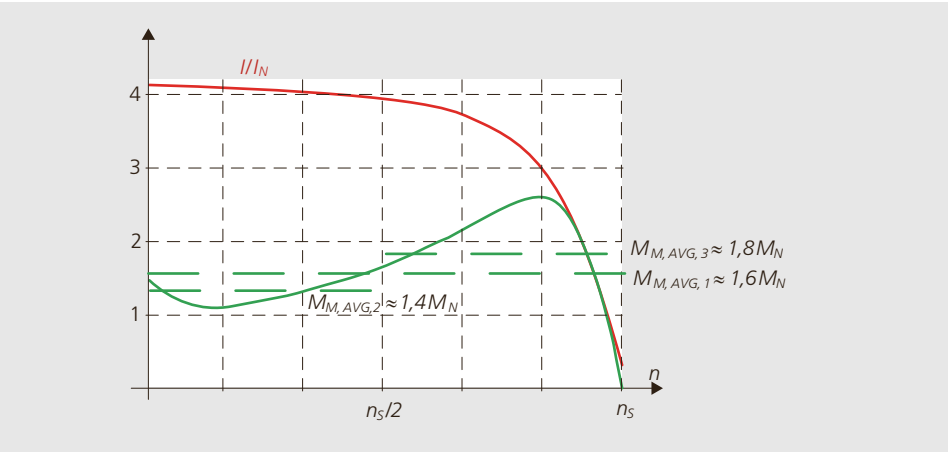


Figure 5.1: Caractéristique de couple et de courant avec les approximations graphiques des valeurs moyennes (Exercice 5.1).

c. jusqu'à 1250 rpm : $M_{M,AVG,4} = M_{M,AVG,1} \approx 1{,}6 \cdot M_N$, ensuite :
$M_{M,AVG,5} = M_{M,AVG,3} \approx 1{,}8 \cdot M_N$

Pour un démarrage en étoile :

$$\dot{n}_4 = \frac{\dot{n}_1}{3} = 9230\,\frac{\text{rpm}}{\text{s}} \rightarrow \Delta t_4 = \frac{1250\text{ rpm}}{9230\,\frac{\text{rpm}}{\text{s}}} = 135\text{ms}$$

Pour un couplage en triangle :

$$\dot{n}_4 \approx \dot{n}_3 = 31163\,\frac{\text{rpm}}{\text{s}} \rightarrow \Delta t_5 = \frac{250\text{rpm}}{31163\,\frac{\text{rpm}}{\text{s}}} = 8\text{ms}$$

Le total est la somme des deux modes de fonctionnement :

$$\Delta t_{4+5} = 135\,ms + 8\text{ms} = \underline{143\text{ms}}$$

d) $\dot{n}_6 = \frac{\dot{n}_1}{3} \rightarrow \Delta t_6 = 3 \cdot \Delta t_1 = \underline{162\text{ms}}$

5.2 Étoile-triangle

a. L'impédance d'une phase est exposée à différentes tensions, il s'en suit :

$$I_{S(\text{étoile})} = \frac{230\text{V}}{Z}; \quad I_{S(\text{triangle})} = \frac{400\text{V}}{Z} = \sqrt{3} \cdot I_{S(\text{étoile})}$$

→ La tension à la phase du moteur sera $\sqrt{3}$ fois plus grande. Par conséquent, le courant sera aussi augmenté. Il y a donc un risque de surchauffe ! Le phénomène est encore accentué par la saturation de la machine.

b. $R_S = 0{,}4\ \Omega$ (Résistance d'une phase du moteur)

Pour un couplage en étoile, le courant nominal circule dans la machine :

$$P_{V,S} = 3 \cdot 0{,}4\Omega \cdot (12\text{A})^2 = \underline{173\text{W}}$$

Pour un couplage triangle le courant est $\sqrt{3}$ plus grand :

$$P_{V,\Delta} = 3 \cdot 0{,}4\Omega \cdot (\sqrt{3} \cdot 12\text{A})^2 = \underline{518\text{W}}$$

c. Dans les conducteurs de ligne, le courant est une nouvelle fois augmenté d'un facteur $\sqrt{3}$ à cause du couplage triangle :

$$I_{L(\text{triangle})} = \sqrt{3} \cdot I_{Str(\text{triangle})} = 3 \cdot I_{Str(\text{étoile})} = 3 \cdot 12\text{A} = \underline{36\text{A}}$$

5.3 ASM en couplage étoile

a. Pour un couplage en étoile, la tension aux bornes de la phase est $\sqrt{3}$ plus petite que la tension à ses bornes (figure 5.2) :

$$U_S = U_N / \sqrt{3} = 400\text{V} / \sqrt{3} = \underline{231\text{V}}$$

b. Pour la puissance apparente, active et réactive :

$$S = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n = \sqrt{3} \cdot 400\text{V} \cdot 7\text{A} = \underline{4{,}85\text{kVA}}$$
$$P = S \cdot \cos(\varphi) = 4850\text{VA} \cdot 0{,}8 = \underline{3{,}88\text{kW}}$$
$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \underline{2{,}91\text{kVAr}}$$

c. D'après les normes, une machine asynchrone IE3 de 2 ou 4 pôles d'une puissance d'environ 4 kW a un rendement d'environ 87 % :

$$P_{me} \approx 0{,}87 P_{el} = 3{,}88\text{kW} \cdot 0{,}87 \approx \underline{3{,}38\text{kW}}$$

d. Pertes cuivres au stator:

$$P_{V,Cu} = 3 \cdot R_S \cdot I_S^2 = 3 \cdot 1{,}2\Omega \cdot (7\text{A})^2 = \underline{176\text{W}}$$

5.4 Alimentation au réseau

a. On peut aisément déduire la vitesse de synchronisme à partir de la vitesse au point nominal :

$$n = 1440\,\text{rpm} \rightarrow n_s = 1500\,\text{rpm} \rightarrow p = \underline{2}$$

$$s_N = \frac{60\text{rpm}}{1500\text{rpm}} = \underline{4\%}$$

b. Avec la résistance de la phase $R_S = 1{,}5\,\Omega$ et un couplage en étoile, les pertes cuivre au stator valent :

$$\rightarrow P_{V,S} = 3 \cdot 1{,}5\Omega \cdot (5{,}9\text{A})^2 = 156\text{W}$$

Les pertes au rotor sont calculées à partir de la puissance d'entrefer.

$$\rightarrow P_\delta = \frac{P_{mech}}{1 - s}, \text{ avec } s_N = 4\% :$$

$$P_{\delta 1} = \frac{3000\text{W}}{0{,}96} = 3125\text{W} \; ; \; \eta_1 = \frac{3000\text{W}}{P_{\delta 1} + P_{V,S}} = \frac{3000\text{W}}{3125\text{W} + 156\text{W}} = \underline{91{,}4\%}$$

c. Avec le courant de 4,2 A, les pertes cuivre valent :

$$P_{V,S2} = 3 \cdot 1{,}5\Omega \cdot (4{,}2\text{A})^2 = 79{,}4\text{W}$$

Lors de petites variations de charges proches de la zone linéaire, le glissement pour un quart du couple nominal est égal au quart du glissement nominal. En tenant compte de la vitesse de rotation synchrone Ω_S on obtient :

$$P_{mech,2} = \Omega_S \cdot (1 - s_2)\frac{M_N}{4} = \frac{\Omega_N}{(1 - s_N)} \cdot (1 - s_2)\frac{P_N}{4 \cdot \Omega_N} = \frac{(1 - s_2)}{(1 - s_N)} \cdot P_N = \frac{0{,}99}{0{,}96}\frac{3000\text{W}}{4} = 773\text{W}$$

Et en fonction de la puissance d'entrefer, le rendement vaut :

$$P_{\delta 2} = \frac{773\text{W}}{0{,}99} = 781\text{W} \; ; \; \eta_2 = \frac{P_{mech,2}}{P_{\delta 2} + P_{V,S2}} = \frac{773\text{W}}{781\text{W} + 79{,}4\text{W}} = \underline{89{,}8\%}$$

d. Comme uniquement la charge accouplée varie et que la vitesse de rotation n'est pas contrôlée, un convertisseur de fréquence ne va pas permettre la réduction des pertes. Au contraire, de par son propre rendement, il va même péjorer le système global. (En fonctionnement avec un champ réduit à charge partielle une légère diminution des pertes serait possible.)

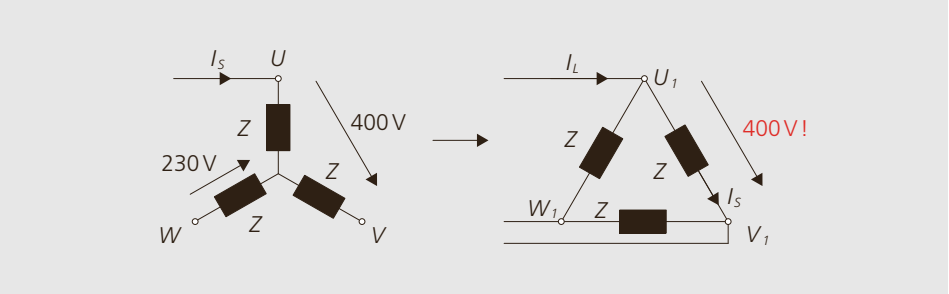


Figure 5.2: Différence entre un couplage étoile et triangle (Exercice 5.2).

5.5 Alimentation U/f d'une ASM

a. Tout d'abord, le courant de phase à vide et au point de fonctionnement nominal est déterminé.

$$I_{S,0} = I_0 / \sqrt{3} = 3\text{A} / \sqrt{3} = \underline{1{,}73\text{A}}$$

$$I_{S,N} = I_N / \sqrt{3} = 5{,}9\text{A} / \sqrt{3} = \underline{3{,}41\text{A}}$$

L'offset de tension (entre deux conducteurs) est déterminé par les résistances ohmiques à l'arrêt :

$$U_{boost,0} = R_S I_0 = 1{,}5\Omega \cdot 1{,}73\text{A} = \underline{2{,}60\text{V}}$$

b. Offset de tension pour le point de fonctionnement nominal :

$$U_{boost,N} = R_S I_N = 1{,}5\Omega \cdot 3{,}41\text{A} = \underline{5{,}11\text{V}}$$

c. La tension de sortie du convertisseur pour la vitesse de rotation nominale et la charge nominale représente le point nominal de la machine, ça signifie $U_n = 400\,\text{V}$.

d. Glissement nominal de la machine :

$$s_N = \frac{n_S - n_N}{n_N} = \frac{1500\text{ rpm} - 1440\text{ rpm}}{1500\text{ rpm}} = \underline{4{,}0\%}$$

e. La vitesse de rotation à vide avec f_S vaut :

$$n_0 = f_S 60 / p = 35\text{Hz} \cdot 60/2 = \underline{1050\text{ rpm}}$$

La fréquence électrique au rotor est donnée par la relation : $f_R = f_{S,N} s_N$. Avec les données au point de fonctionnement nominal, la fréquence rotorique nominale vaut :

$$f_{R,N} = f_{S,N} s_N = 50\text{Hz} \cdot 4{,}0\% = \underline{2{,}0\text{Hz}}$$

Si l'on utilise l'approximation de couple pour des faibles glissements, il s'ensuit que le couple est proportionnel à la fréquence rotorique :

$$M = \frac{2M_K}{s_K} s = \frac{2M_K}{s_K} \frac{f_R}{f_S} = 2M_K \frac{2\pi f_S L_\sigma}{R'_R} \frac{f_R}{f_S} = 2M_K \frac{2\pi L_\sigma}{R'_R} f_R$$

Il faut relever que dans cette équation le couple de décrochage est constant seulement si le rapport U/f et ainsi la magnétisation de la machine est constante. Ceci est valable uniquement dans la plage de réglage de la tension. Dès lors, la fréquence au stator doit être augmentée de la fréquence rotorique pour la charge nominale :

$$f_S = f_{S,0} + f_{R,N} = 35\text{Hz} + 2{,}0\text{Hz} = \underline{37\text{Hz}}$$

5.6 Alimentation U/f d'une SM

a. Les définitions des grandeurs et des angles sont représentés à la figure 5.3. Le courant est en phase avec la tension induite U_P. Par conséquent, le facteur de puissance interne est $\cos\varphi = 1$. Puisque la machine est connectée en étoile, le courant dans la machine est le même que le courant de ligne.

$$P_{i,me} = 3 \cdot U_P \cdot I_{S,N} \cdot \cos\varphi = 3 \cdot \frac{U_{S,0}}{\sqrt{3}} I_{S,N} \cdot 1$$

$$= 3 \cdot \frac{432\text{V}}{\sqrt{3}} 15\text{A} \cdot 1 = \underline{11{,}2\text{kW}}$$

b. La tension de la phase de la machine en étoile vaut :

$$U_{S,N} = U_N / \sqrt{3} = 480\text{V}/\sqrt{3} = \underline{277\text{V}}$$

c. L'offset de tension à l'arrêt pour un couple nul est zéro puisqu'aucun courant n'est nécessaire. Offset de tension à l'arrêt pour un couple nominal : Dans ce cas, le courant nominal est fourni :

$$U_{boost} = \sqrt{3} \cdot R_S I_S = \sqrt{3} \cdot 0{,}8\Omega \cdot 15\text{A} = \underline{20{,}8\text{V}}$$

d. En premier, la tension induite (tension à vide d'une phase de la machine) au point de fonctionnement nominale est calculée :

$$U_{P,N} = U_{N,0} / \sqrt{3} = 432\text{V}/\sqrt{3} = \underline{249\text{V}}$$

La tension induite est toujours proportionnelle à la vitesse :

$$U_P = U_{P,N} \frac{f_S}{f_{S,N}} = \underline{249\text{V} \frac{f_S}{60\text{Hz}}}$$

e. Le courant est en phase avec la tension induite, ceci signifie que la chute de tension aux bornes de l'inductance L_d est en avance de 90° par rapport à la tension induite. La tension aux bornes de l'inductance vaut alors :

$$U_{S,N} = \sqrt{U_P^2 + U_L^2} = 480\text{V}/\sqrt{3} = 277\text{V}$$

$$\Rightarrow \quad U_{Ld} = \sqrt{U_{S,N}^2 - U_P^2} = \sqrt{(277\text{V})^2 - (249\text{V})^2} = \underline{121\text{V}}$$

Finalement pour la réactance X_d et l'inductance L_d :

$$X_S = \omega L_S = U_L / I_S = 121\text{V}/15\text{A} = 8{,}09\Omega$$

$$L_S = X_S / \omega = 8{,}09\Omega / (2\pi 60\text{Hz}) = \underline{21{,}5\text{mH}}$$

f. La connexion de la machine à vide au réseau 400 V / 50 Hz impose les tensions de phases de la machine et la tension induite suivantes :

$$U_S = 400\text{V}/\sqrt{3} = 231\text{V}$$

$$U_P = U_{P,N} \frac{50Hz}{60Hz} = 249\text{V} \cdot 0{,}833 = 207\text{V}$$

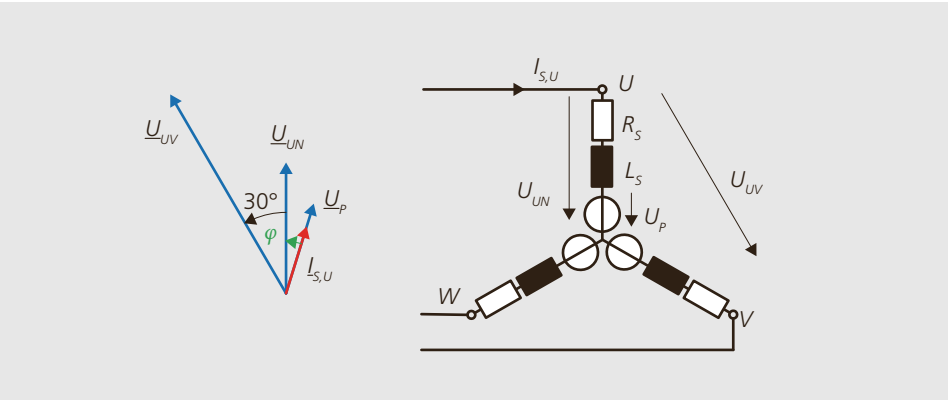


Figure 5.3: Valeurs mesurées et diagramme des phaseurs d'une SM (Exercice 5.6).

La différence entre la tension de phase de la machine et la tension induite produit seulement une puissance réactive, puisqu'à vide, en négligeant la résistance de phase, la puissance active est nulle:

$$I_S = U_{LS}/X_{LS} = \frac{U_S - U_P}{\omega_{LS}}$$
$$= \frac{231\text{V} - 207\text{V}}{2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 21{,}5\text{mH}} = \underline{3{,}55\text{A}}$$

5.7 Affaiblissement du champ pour une PSM

a. Le courant d'affaiblissement du champ I_d est produit par la chute de tension sur l'inductance L_d. La tension aux bornes de la machine reste constante à 400 V. La tension induite va augmenter avec un rapport 75 Hz/50 Hz, c.-à-d. un facteur 1,5. La chute de tension se calcule comme suit:

$$U_{Ld} = U_S - U_P = 400\text{V}/\sqrt{3} - (75\text{Hz}/50\text{Hz}) \cdot 360\text{V}/\sqrt{3} = -80{,}8\text{V}$$

Le courant I_d à travers L_d se calcule à l'aide de la chute de tension et de l'impédance:

$$I_d = \frac{U_{Ld}}{\omega L_d} = \frac{-80{,}8\text{V}}{2\pi \cdot 75\text{Hz} \cdot 0{,}021\,\Omega} = \underline{-8{,}16\text{A}}$$

b. Le courant dans l'axe-q encore disponible est en quadrature avec le phaseur du courant I_d. La combinaison des deux forme le courant statorique. Il s'en suit:

$$I_q = \sqrt{I_n^2 - I_d^2} = \sqrt{15\text{A}^2 - 8{,}16\text{A}^2} = \underline{12{,}6\text{A}}$$

Il ne reste alors que 84 % de courant disponible pour la formation du couple par rapport au courant initial, réduisant du même facteur le couple.

Remarque: Durant le fonctionnement en affaiblissement du champ, la chute de tension sur l'inductance a tendance à réduire la tension aux bornes de la machine. La tension induite de la machine n'est pas influencée par ce mode de fonctionnement. Par conséquent le facteur de couple de la machine reste inchangé.

c. Pour une SM, un courant dans l'axe-d apparaît seulement pour un fonctionnement en affaiblissement du champ. Il en résulte une diminution du couple pour un courant statorique constant $I_{S,n}$.

L'inverse se produit pour une ASM: En affaiblissement du champ le courant dans l'axe d devient plus faible et par conséquent le courant dans l'axe-q est plus grand.

Remarque: Comme le champ magnétique d'une ASM est créé par le courant dans l'axe-d, sa réduction implique aussi une réduction de la constante de couple définie en rapport avec le courant dans l'axe-q.

6. Dimensionnement et mise en œuvre

6.1 Services type et échauffement

a. Le profil de vitesse donné correspond à un fonctionnement en continu (pas d'arrêt durant le profil) avec des diminutions de puissance (charge à vide, par exemple des frottements). Ceci correspond au service type S6. Les exemples pour ce fonctionnement sont :

- Machine d'usinage (comme par exemple fraiseuse, machine de polissage) avec des cycles de charges et de fonctionnement à vide avec des frottements.
- Engin de levage avec transport d'une charge à la montée et retour au point de départ sans charge.
- Laminoirs avec cycles de charge

b. Le couple efficace nécessaire se calcule comme suit :

$$M_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int M^2(t)dt}$$

L'intégrale se calcule avec des intervalles constants du couple :

$$M_{eff} = \sqrt{\frac{1}{20\text{s}}\cdot\left((5\text{Nm})^2\cdot 10\text{s} + (20\text{Nm})^2\cdot 10\text{s}\right)} = \underline{14{,}6\text{Nm}}$$

c. L'échauffement moyen pour la charge donnée est de :

$$\Delta T_{S6} = \Delta T_N \cdot \left(\frac{M_{eff}}{M_N}\right)^2 = 80°\text{C}\cdot\left(\frac{14{,}6}{18}\right)^2 = \underline{52.6°\text{C}}$$

d. L'approximation de l'échauffement de température pendant les 10 s à 20 Nm est :

$$\Delta T_Z = \Delta T_N \cdot \frac{\Delta t}{T_{Th}}\cdot\left(\frac{M}{M_N}\right)^2 = 80°\text{C}\cdot\frac{10\text{s}}{30\text{s}}\left(\frac{20}{18}\right)^2 = \underline{32.9°\text{C}}$$

e. De là, on peut en déduire les valeurs maximales et minimales de température :

$$T = T_U + \Delta T_{S6} \pm \Delta\frac{T_Z}{2} = 40°\text{C} + 52{,}6°\text{C} \pm 16{,}5°\text{C} = \underline{109°\text{C}/76°\text{C}}$$

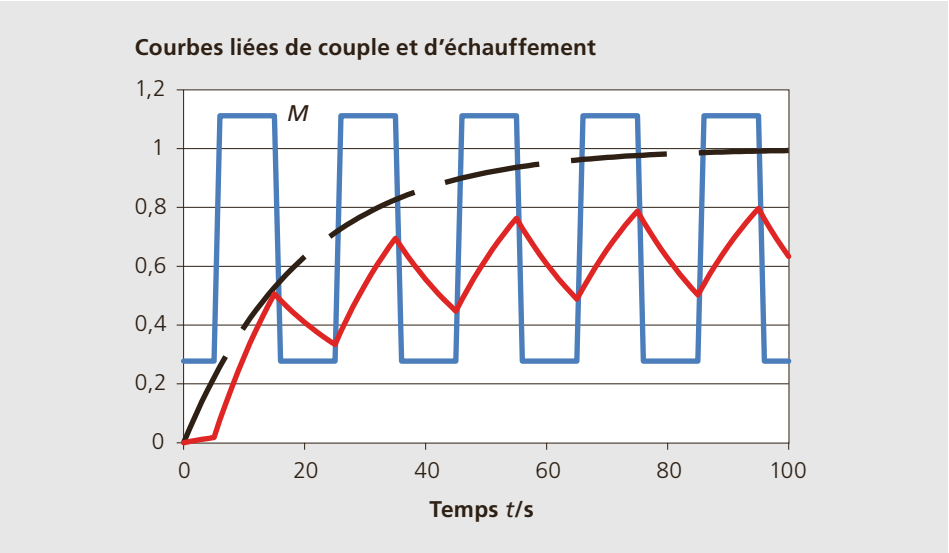


Figure 6.1: Courbe calculée d'échauffement (rouge) pour le cas de charge donné (couple en bleu). Par comparaison: Echauffement correspondant à une charge nominale constante (noir). (Exercice 6.1)

Remarque: Avec un couple de 5 Nm, un échauffement stationnaire de 80 °C $(5/18)^2$ = 6,2 °C sera atteint. Le moteur se refroidirait alors de 63 °C pour passer de 109 °C à 46.2 °C. Si l'approximation linéaire est considérée durant les 10 s de la phase à faible charge, le refroidissement sera de 63 °C · 10s/30s = 21 °C Les deux approximations de différence de température (32.9 °C et 21 °C) présentent une grande disparité. La linéarisation n'est à utiliser qu'en cas d'approximation. Un calcul exact doit être fait avec la formule d'échauffement présentée à la section 6.3. Le résultat obtenu par le calcul est présenté à la figure 6.1. Il en résulte de cette manière un échauffement moyen de 52 °C pour une plage de température située entre 104 °C et 80 °C.

6.2 Broche d'entraînement

a. La précision de mesure se calcule comme suit :

$$\Delta\varphi = 20' = \frac{1}{3}° \rightarrow \Delta x = \frac{h}{360°} \cdot \Delta\varphi = \underline{0{,}01\text{mm}}$$

Il convient de souligner, que le jeu mécanique et l'élasticité des matériaux détériorent la précision.

b. La distance de 1 m doit être réalisée avec un profil triangulaire en 2 s :

$$v_{moy.} = \frac{1\text{m}}{2\text{s}} = 0{,}5\ \text{m/s}$$

Le profil triangulaire de vitesse présenté à la figure 6.2 montre que la vitesse maximale est deux fois plus grande que la valeur moyenne. Par conséquent :

$$v_{max} = 1\ \text{m/s}$$

La vitesse maximale de la broche peut être calculée en utilisant la vitesse linéaire maximale et le pas de la broche :

$$f_{\max} = \frac{1\text{m/s}}{10\text{mm/tour}} = 100\text{Hz} \cong \underline{6000\ \text{rpm}}$$

c. Le couple nécessaire se calcule à l'aide du pas de la broche et de la force comme suit :

$$M = \frac{h \cdot F}{2\pi}, \text{ avec } F = m \cdot a = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} = 100\text{kg} \cdot \frac{1\text{m/s}}{1\text{s}} = 100\text{N}$$

$$\rightarrow M = \frac{h \cdot F}{2\pi} = \frac{10\text{mm} \cdot 100\text{N}}{2\pi} = \underline{1{,}6\text{Nm}}$$

La puissance maximale est atteinte lors de la vitesse de rotation maximale :

$$P_{\max} = M \cdot \frac{n_{\max}}{60} \cdot 2\pi = 1{,}6\text{Nm} \cdot \frac{6000\ \text{rpm}}{60} \cdot 2\pi = \underline{1\text{kW}}$$

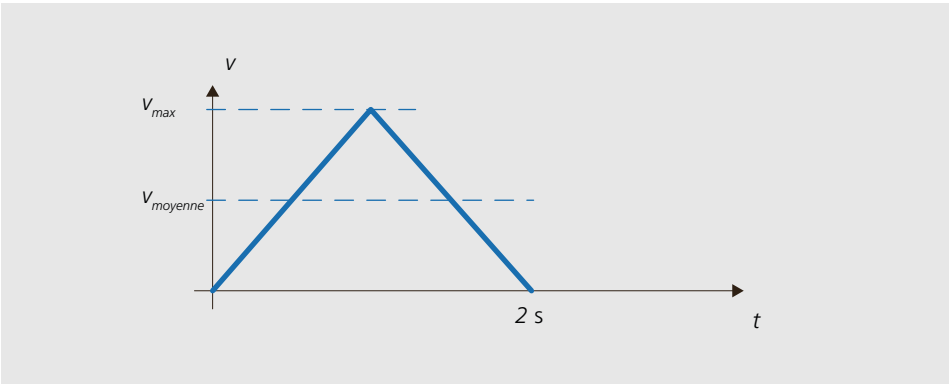


Figure 6.2: Profil de vitesse pour l'entraînement broche (Exercice 6.2).

d. Durant la phase de freinage, l'énergie cinétique suivante est freinée :

$$E_B = m \cdot \frac{v^2}{2} = \frac{100\text{kg} \cdot (1\,\text{m/s})^2}{2} = 50\text{J} = \underline{50\text{Ws}}$$

e. L'énergie stockée dans le condensateur vaut :

$$E_K = \frac{1}{2}CU^2 \rightarrow \Delta E = \frac{1}{2}C \cdot [(U + \Delta U)^2 - U^2] = \frac{1}{2}C \cdot (\Delta U^2 + 2 \cdot U \cdot \Delta U)$$

$$\rightarrow C = \frac{2 \cdot \Delta E}{\Delta U^2 + 2 \cdot U \cdot \Delta U} = \frac{2 \cdot 50\text{Ws}}{(80\text{V})^2 + 2 \cdot 560\text{V} \cdot 80\text{V}} = \underline{1{,}04\text{mF}}$$

6.3 Dimensionnement d'une transmission

a. Sans charge : $\sqrt{\frac{J_L}{J_M}}$

Le couple d'accélération nécessaire du côté de la charge est identique pour tous les cas et se calcule comme suit :

$$M_{BL} = \frac{n_L}{60} \cdot 2\pi \cdot \frac{1}{t_B} \cdot J_L = 25{,}1\text{Nm}$$

Pour la machine (avant la transmission) : $M_{BL}^* = \frac{M_{BL}}{i}$

Pour la machine, son propre couple d'accélération vaut :

$$M_{BM} = \frac{i}{t_B} \cdot \frac{n_L}{60} \cdot 2\pi \cdot J_M$$

Le couple nécessaire est la somme des deux composantes :

$$M_{Tot} = M_{BL}^* + M_{BM}$$

Les résultats pour les 3 cas sont listés au tableau 6.1 et sont comparés avec le couple minimal atteint $M_{tot,opt}$.
Cas 1 : Comme il s'agit d'un entraînement direct, $i = 1$ est fixe. Le rapport optimal ne peut pas être choisi.
Cas 2: Le moteur ne peut pas tourner aussi vite et par conséquent i doit être réduit par rapport à i_{opt}.
Cas 3 : Le moteur est capable de tourner à la vitesse demandée et par conséquent le rapport de transmission optimal peut être choisi. Le couple résultant vaut alors $M_{tot,opt}$. Le moteur et la charge ont besoin du même couple d'accélération lorsque la condition $i_{choisi} = i_{opt}$ est remplie, c'est-à-dire chacun la moitié de 2.5 Nm. Ceci correspond au couple le plus faible pour l'accélération requise de la charge.

Cas	**1**	**2**	**3**
i_{opt}	1,1	4,37	20,2
i_{max} dû à la limite de vitesse $i_{\max} = \frac{n_{\max}}{n_L}$	1	3,75	30
Choix de i	1	3,75	20,2
M_{BL}	25.1	25.1	25.1
M_{BL}*	25,1	6,7	1,24
M_{BM}	20,8	4,92	1,24
M_{tot}	45,9	11,6	2,50
$M_{tot,opt}$	45,7	11,4	2,50

Tableau 6.1: Résultats pour les 3 entraînements considérés.

6.4 Protection d'un entraînement avec fusible coupe-circuit: Solutions

a. D'après la figure 6.3, le rendement nominal vaut environ 92 %.

b. Puissance active et puissance apparente côté réseau :

$$P_N = P_{me}/(\eta_{ASM}\,\eta_{SR}) = 15\text{kW}/(0{,}92\cdot 0{,}95) = \underline{17{,}2\text{kW}}$$

$$S_N = P_N/\cos\varphi = 17{,}2\text{kW}/0{,}90 = \underline{19{,}1\text{kVA}}$$

c. Pour une puissance apparente connue, le courant de ligne vaut :

$$S_N = U_N I_N \sqrt{3} \quad \rightarrow \quad I_N = S_N/(U_N\sqrt{3}) = 19{,}1\text{kVA}/(400\text{V}\sqrt{3}) = \underline{27{,}6\text{A}}$$

d. Protection : Si les surcharges sont courtes et petites, un fusible lent de 35 A est optimal. Pour des grandes surcharges, il serait judicieux d'augmenter év. à 50 A. Les conducteurs doivent aussi être ajustés en conséquence.

6.5 Protection d'un entraînement par déclenchement thermique ou magnétique

a. La puissance réactive constante doit être calculée au point de fonctionnement nominal :

$$P_N = S_N\cos\varphi_N = \sqrt{3}U_N I_N\cos\varphi_N = \sqrt{3}\cdot 400\text{V}\cdot 50\text{A}\cdot 0{,}85 = 34{,}6\text{kVA}\cdot 0{,}85$$

$$Q_N = \sqrt{S_N^2 - P_N^2} = \underline{18{,}25\text{kVAr}}$$

b. La puissance apparente pour les deux cas de fonctionnement se calcule en tenant compte de la valeur constante de la puissance réactive et de la puissance active respective :

$$S_{150\%} = \sqrt{P_{150\,\%}^2 + Q_N^2} = \sqrt{(1{,}5\cdot 29{,}4\text{kW})^2 + 18{,}25\text{kVAr}^2} = \underline{47{,}8\text{kVA}}$$

$$S_{30\%} = \sqrt{P_{30\,\%}^2 + Q_N^2} = \sqrt{(0{,}3\cdot 29{,}4\text{kW})^2 + 18{,}25\text{kVAr}^2} = \underline{20{,}27\text{kVA}}$$

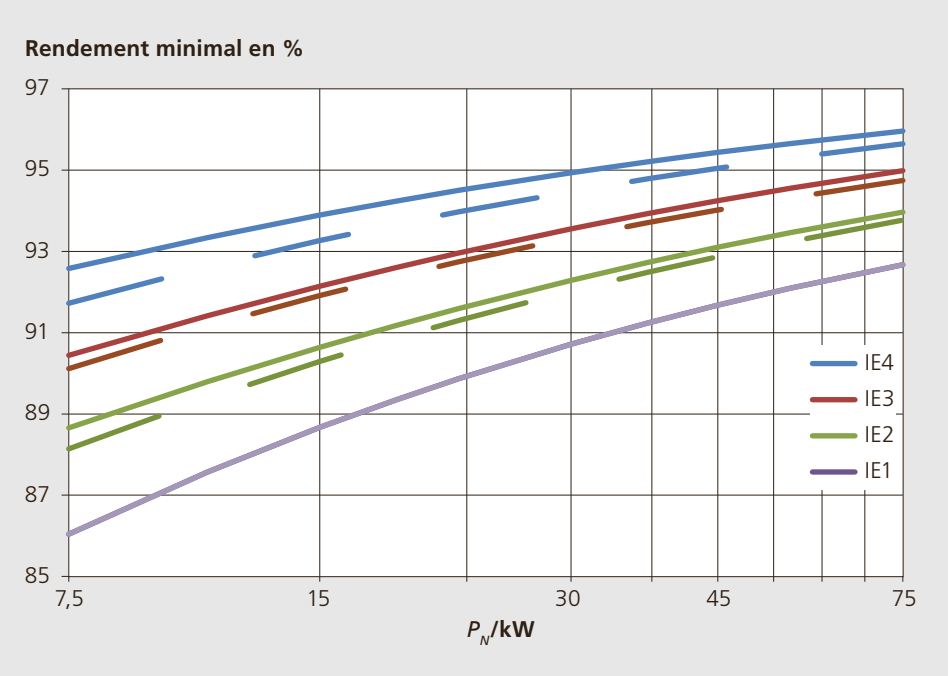


Figure 6.3: Exigences de rendement pour les différentes classes IE, lignes continues pour les moteurs 4 pôles (Exercice 6.4).

c. Les courants de ligne en fonction des puissances apparentes valent :

$$I_{150\%} = S_{150\,\%} \big/ (U\sqrt{3}) = 47{,}8\text{kVA} \big/ (400\text{V}\sqrt{3}) = \underline{69{,}0\text{A}}$$
$$I_{30\%} = S_{30\,\%} \big/ (U\sqrt{3}) = 20{,}3\text{kVA} \big/ (400\text{V}\sqrt{3}) = \underline{29{,}3\text{A}}$$

d. La valeur efficace moyenne du courant de ligne vaut pour des valeurs constantes :

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^t i'^2(t)dt'} = \sqrt{\frac{1}{T}(I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2)}$$
$$= \sqrt{\frac{1}{T}(I_{30\%}^2 \cdot 0{,}8T + I_{150\%}^2 \cdot 0{,}2T)} = \sqrt{(29{,}3\text{A}^2 \cdot 0{,}8 + 69{,}0\text{A}^2 \cdot 0{,}2)} = \underline{40{,}5\text{A}}$$

e. **Réglage des limites:** les limites doivent logiquement être ajustées pour qu'elles ne déclenchent pas lors d'un fonctionnement normal. Par conséquent une marge de 30 % est introduite et les valeurs thermiques et magnétiques valent :

$I_M = 1{,}3 \cdot 69{,}0\,\text{A} \approx \underline{90\,\text{A}}$

$I_T = 1{,}3 \cdot 40{,}5\,\text{A} \approx \underline{53\,\text{A}}$