Université MOHAMED BOUDIAF de Msila
Faculté de Technologie
Département de génie électrique

M1ELM

Corrigé type de l'Epreuve finale de modélisation et simulation des machines électriques

12 P

Exercice 01

Cocher la bonne ou les bonnes réponses :

1- Simulation d'un système physique signifie :

1

- ☐ Etudier le comportement d'un modèle mathématique en utilisant son système physique équivalent.
- ■ Etudier le comportement d'un phénomène physique en utilisant son modèle mathématique équivalent.

2- L'intérêt de la simulation est de :

1

- ☐ Augmenter le coût du système physique.
- ☐ Minimiser les pertes du système physique étudié.
- ■ Minimiser les dépenses (coûts) d'étude du système physique.
- ■ Réduire le temps d'étude du système physique
- ■ Eviter les risques du système physique.

3- Modélisation d'un système physique signifie :

1

- ☐ Exprimer un phénomène physique par un modèle physique équivalent.
- ■ Exprimer un phénomène physique par un modèle mathématique équivalent.
- ☐ Exprimer un modèle mathématique par un phénomène physique équivalent.

4- Dans le système triphasé ABC de la machine asynchrone :

4.a.

1

- ■ Les inductances mutuelles stator/stator sont constantes.
- ☐ Les inductances mutuelles stator/stator sont variables.

4.b.

1

- ☐ Les inductances mutuelles stator/rotor sont constantes.
- ■ Les inductances mutuelles stator/rotor sont variables.

5- Les grandeurs électriques (tension et courant) et magnétique (flux) du moteur asynchrone triphasé sont :

5.a.

1

- ■ Des grandeurs alternatives dans le repère fixe de Concordia (lié au stator).
- ☐ Des grandeurs continues dans le repère fixe de Concordia (lié au stator).

5.b.

1 □ Des grandeurs alternatives dans le repère de Park tournant lié au rotor.
■ Des grandeurs continues dans le repère de Park tournant lié au rotor.

5.c.

1 □ Des grandeurs alternatives dans le repère de Park tournant lié au flux statorique.
■ Des grandeurs continues dans le repère de Park tournant lié au flux statorique.

5.d.

1 □ Des grandeurs alternatives dans le repère de Park tournant lié au flux rotorique.
■ Des grandeurs continues dans le repère de Park tournant lié au flux rotorique.

6- Dans le système de Park de la machine asynchrone :

1 ■ Toutes les inductances (propres et mutuelles) sont constantes.
□ Toutes les inductances (propres et mutuelles) sont variables.

7- La transformation de Laplace (domaine temporel au domaine fréquentiel) rendre les équations du modèle équivalent de la machine asynchrone triphasé :

1 ■ Plus facile à résoudre.
□ Plus difficile à résoudre.

8- Les termes de couplage entre les grandeurs des phases (statoriques/statoriques) et (statorique/rotoriques) sont :

1 ■ Plus nombreuses dans le système triphasé (ABC) que dans le système de Park (dq).
□ Moins nombreuses dans le système triphasé (ABC) que dans le système de Park (dq).

Exercice 02

La figure suivante présente la machine asynchrone triphasée dont les phases statoriques sont présentées par ses axes (**As, Bs** et **Cs**) et les bobines rotorioques sont présentées par ses axes (**ar, br** et **cr**). Le passage du repère réel triphasé (abc) au repère fictif biphasé orthogonal est d'axes (**uv**) s'effectue en faisant correspondre aux variables réelles statoriques et rotoriques leurs composantes directe, en quadrature et homopolaire, tout en faisant intervenir les angles entre les axes des enroulements statorique (**As, Bs** et **Cs**), les axes rotoriques (**ar, br** et **cr**) et les axes du repère fictif (**u,v**).

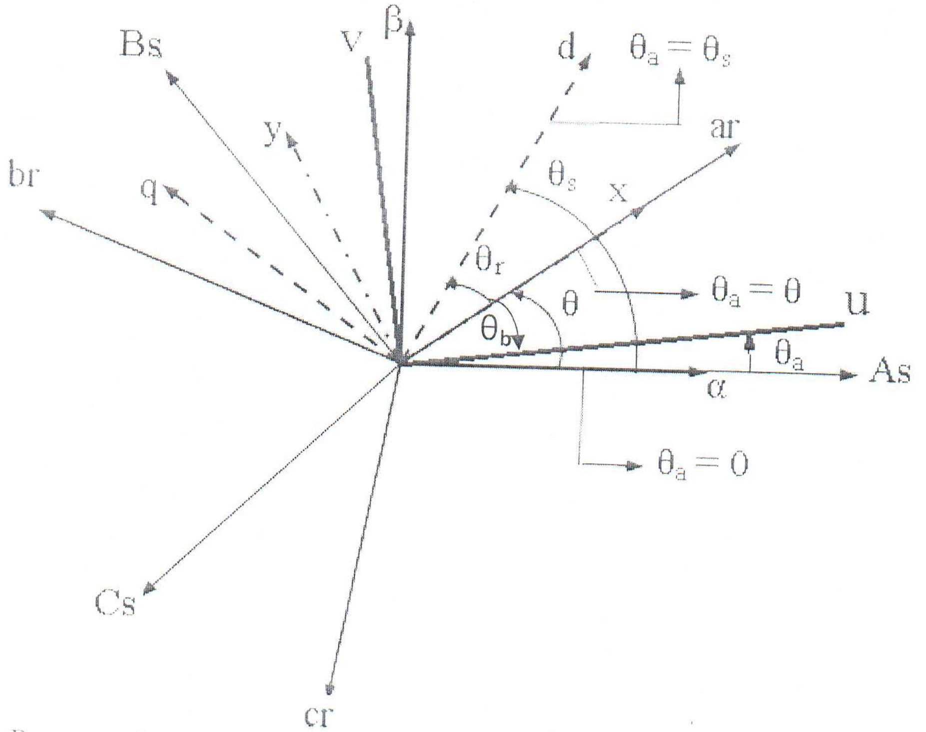

Figure 2 : Passage du système triphasé au système biphasé et inversement pour une MAS

θ_a : Représente l'angle instantané entre la phase de l'axe statorique x_{As} et l'axe u.
θ_b : Représente l'angle instantané entre la phase de l'axe rotorique x_{ar} et l'axe u. ($\theta_b = \theta - \theta_a$)

$\omega_a = \dfrac{d\theta_a}{dt}$: Vitesse angulaire de rotation de l'axe (**u**) du repère d'axes biphasés (**uv**) par rapport à l'axe (**As**) du repère d'axes triphasés statoriques (**ABC**).

$\omega = \dfrac{d\theta}{dt}$: Vitesse angulaire de rotation de l'axe (**ar**) du rotor par rapport à l'axe (**As**) du repère d'axes triphasés statoriques (**ABC**).

$\omega_s = \dfrac{d\theta_s}{dt}$: Vitesse angulaire de rotation du champ tournant (statorique) par rapport à l'axe (**As**) du repère d'axes triphasés statoriques (**ABC**).

$\omega_r = \dfrac{d\theta_r}{dt}$: Vitesse angulaire de rotation du champ tournant (statorique) par rapport à l'axe (**ar**) du rotor.

$$\begin{bmatrix} V_{su} \\ V_{sv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{su} \\ i_{sv} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{su} \\ \Phi_{sv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_a \\ \omega_a & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{su} \\ \Phi_{sv} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ru} \\ V_{rv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ru} \\ i_{rv} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ru} \\ \Phi_{rv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_a - \omega) \\ (\omega_a - \omega) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ru} \\ \Phi_{rv} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{su} \\ \Phi_{ru} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{su} \\ i_{ru} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sv} \\ \Phi_{rv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sv} \\ i_{rv} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Avec :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance propre cyclique du stator.

$L_r = l_r - M_r$: Inductance propre cyclique du rotor.

$M = \frac{3}{2} M_0$: Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

1- A partir du modèle de la machine asynchrone triphasé dans le repère (uv), déduire le modèle équivalent de la machine dans chacun des différents repères indiqués dans la figure 2. (On exige un calcul détaillé).

a- Référence (α,β) (référence lié au stator)

Il se traduit par les conditions:

$$\theta_a = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} U \rightarrow \alpha \\ V \rightarrow \beta \end{cases} \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_a}{dt} = \omega_a = 0 \quad (\theta_b = \theta - \theta_a)$$

Les équations électriques prennent la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{s\alpha} \\ \Phi_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

0,25
0,25

$$\begin{bmatrix} V_{r\alpha} \\ V_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{r\alpha} \\ \Phi_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{r\alpha} \\ \Phi_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

0,25
0,25

Avec

$$\begin{bmatrix} \Phi_{s\alpha} \\ \Phi_{r\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{r\alpha} \end{bmatrix} \quad (9)$$

0,25
0,25

$$\begin{bmatrix} \Phi_{s\beta} \\ \Phi_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\beta} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

0,25
0,25

b- Référence (x, y) (référence lié au rotor)

Il se traduit par les conditions :

$$\theta_a = \theta \Rightarrow \begin{cases} U \rightarrow X \\ V \rightarrow Y \end{cases} \quad \text{et} \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega = \omega_a \quad (\theta_b = \theta - \theta_a = 0)$$

Les équations électriques prennent la forme suivante:

$$\begin{bmatrix} V_{sx} \\ V_{sy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sx} \\ i_{sy} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sx} \\ \Phi_{sy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{sx} \\ \Phi_{sy} \end{bmatrix} \tag{11}$$

0,25 0,25

$$\begin{bmatrix} V_{rx} \\ V_{ry} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rx} \\ i_{ry} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{rx} \\ \Phi_{ry} \end{bmatrix} \tag{12}$$

0,25 0,25

Avec

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sx} \\ \Phi_{rx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sx} \\ i_{rx} \end{bmatrix} \tag{13}$$

0,25 0,25

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sy} \\ \Phi_{ry} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sy} \\ i_{ry} \end{bmatrix} \tag{14}$$

0,25 0,25

c- Référence (d, q) (référence lié au champ tournant)

Il se traduit par les conditions :

$$\theta_a = \theta_s \Rightarrow \begin{cases} U \rightarrow d \\ V \rightarrow q \end{cases} \quad \text{et} \quad \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_a \quad \text{Avec } \omega_s - \omega = \omega_r \quad (\theta_b = \theta - \theta_a = \theta - \theta_s)$$

Les équations électriques prennent la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} \tag{15}$$

0,25 0,25

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} \tag{16}$$

0,25 0,25

Avec

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{rd} \end{bmatrix} \tag{17}$$

0,25 0,25

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sq} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \tag{18}$$

0,25 0,25

2- Oui, il est possible d'utiliser le modèle de la MAS dans le référentiel (α,β lié au stator) pour modéliser le défaut de type phase statorique ouverte (coupure de phase statorique).

Justification :

On peut modéliser le défaut de type phase statorique ouverte (coupure de phase statorique) en mettant ($i_{s\alpha} = 0$) qui représente la coupure de la phase statorique (a), car ($i_{s\alpha} = i_{sa}$) :

$$i_{s\alpha} = \frac{2}{3}(i_{sa}\cos(\theta_a) + i_{sb}\cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) + i_{sc}\cos(\theta_a - \frac{4\pi}{3})) \quad \text{avec } \theta_a = 0$$

$$i_{s\alpha} = \frac{2}{3}(i_{sa}\cos(0) + i_{sb}\cos(0 - \frac{2\pi}{3}) + i_{sc}\cos(0 - \frac{4\pi}{3}))$$

$$i_{s\alpha} = \frac{2}{3}(i_{sa}.1 + i_{sb}(-\frac{1}{2}) + i_{sc}(-\frac{1}{2})) = \frac{2}{3}(i_{sa} + (-\frac{1}{2})(i_{sb} + i_{sc})) = \frac{2}{3}(i_{sa} + (-\frac{1}{2})(-i_{sa})) = \frac{2}{3}(i_{sa} + \frac{1}{2}i_{sa})$$

$$i_{s\alpha} = \frac{2}{3}(\frac{3}{2}i_{sa}) = i_{sa}$$

Université MOHAMED BOUDIAF de Msila
Faculté de Technologie
Département de génie électrique

Epreuve finale de modélisation et simulation des machines électriques

Exercice 01

Cocher la bonne ou les bonnes réponses :

1- Simulation d'un système physique signifie :

□ Etudier le comportement d'un modèle mathématique en utilisant son système physique équivalent.
□ Etudier le comportement d'un phénomène physique en utilisant son modèle mathématique équivalent.

2- L'intérêt de la simulation est de :

□ Augmenter le coût du système physique.
□ Minimiser les pertes du système physique étudié.
□ Minimiser les dépenses (coûts) d'étude du système physique.
□ Réduire le temps d'étude du système physique
□ Eviter les risques du système physique.

3- Modélisation d'un système physique signifie :

□ Exprimer un phénomène physique par un modèle physique équivalent.
□ Exprimer un phénomène physique par un modèle mathématique équivalent.
□ Exprimer un modèle mathématique par un phénomène physique équivalent.

4- Dans le système triphasé ABC de la machine asynchrone :
4.a.
□ Les inductances mutuelles stator/stator sont constantes.
□ Les inductances mutuelles stator/stator sont variables.

4.b.
□ Les inductances mutuelles stator/rotor sont constantes.
□ Les inductances mutuelles stator/rotor sont variables.

5- Les grandeurs électriques (tension et courant) et magnétique (flux) du moteur asynchrone triphasé sont :
5.a.
□ Des grandeurs alternatives dans le repère fixe de Concordia (lié au stator).
□ Des grandeurs continues dans le repère fixe de Concordia (lié au stator).

5.b.
□ Des grandeurs alternatives dans le repère de Park tournant lié au rotor.
□ Des grandeurs continues dans le repère de Park tournant lié au rotor.

5.c.

☐ Des grandeurs alternatives dans le repère de Park tournant lié au flux statorique.
☐ Des grandeurs continues dans le repère de Park tournant lié au flux statorique.

5.d.

☐ Des grandeurs alternatives dans le repère de Park tournant lié au flux rotorique.
☐ Des grandeurs continues dans le repère de Park tournant lié au flux rotorique.

6- Dans le système de Park de la machine asynchrone :

☐ Toutes les inductances (propres et mutuelles) sont constantes.
☐ Toutes les inductances (propres et mutuelles) sont variables.

7- La transformation de Laplace (domaine temporel au domaine fréquentiel) rendre les équations du modèle équivalent de la machine asynchrone triphasé :

☐ Plus facile à résoudre.
☐ Plus difficile à résoudre.

8- Les termes de couplage entre les grandeurs des phases (statoriques/statoriques) et (statorique/rotoriques) sont :

☐ Plus nombreuses dans le système triphasé (ABC) que dans le système de Park (dq).
☐ Moins nombreuses dans le système triphasé (ABC) que dans le système de Park (dq).

Exercice 02

La figure suivante présente la machine asynchrone triphasée dont les phases statoriques sont présentées par ses axes (**As, Bs** et **Cs**) et les bobines rotorioques sont présentées par ses axes **(ar, br** et **cr)**. Le passage du repère réel triphasé (abc) au repère fictif biphasé orthogonal est d'axes **(uv)** s'effectue en faisant correspondre aux variables réelles statoriques et rotoriques leurs composantes directe, en quadrature et homopolaire, tout en faisant intervenir les angles entre les axes des enroulements statorique (**As, Bs** et **Cs**), les axes rotoriques (**ar, br** et **cr**) et les axes du repère fictif **(u,v)**.

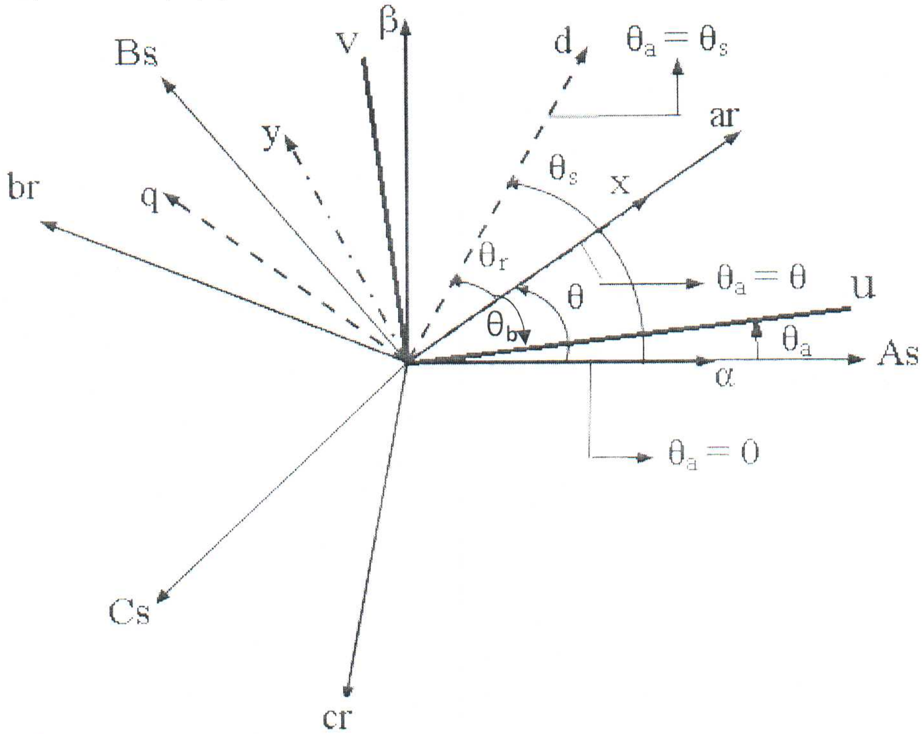

Figure 2 : Passage du système triphasé au système biphasé et inversement pour une MAS

θ_a : Représente l'angle instantané entre la phase de l'axe statorique x_{As} et l'axe u.

θ_b : Représente l'angle instantané entre la phase de l'axe rotorique x_{ar} et l'axe u. ($\theta_b = \theta - \theta_a$)

$\omega_a = \dfrac{d\theta_a}{dt}$: Vitesse angulaire de rotation de l'axe **(u)** du repère d'axes biphasés **(uv)** par rapport à l'axe (**As**) du repère d'axes triphasés statoriques (**ABC**).

$\omega = \dfrac{d\theta}{dt}$: Vitesse angulaire de rotation de l'axe **(ar)** du rotor par rapport à l'axe (**As**) du repère d'axes triphasés statoriques (**ABC**).

$\omega_s = \dfrac{d\theta_s}{dt}$: Vitesse angulaire de rotation du champ tournant (statorique) par rapport à l'axe (**As**) du repère d'axes triphasés statoriques (**ABC**).

$\omega_r = \dfrac{d\theta_r}{dt}$: Vitesse angulaire de rotation du champ tournant (statorique) par rapport à l'axe **(ar)** du rotor.

Le passage du système triphasé de tension statorique **(abc)** au système triphasé statorique **(uvo)** s'obtient à partir de la matrice de transformation de PARK $[P(\theta_a)]$, sachant que la composante homopolaire V_{so} est nulle pour les systèmes triphasés équilibrés.

$$\begin{bmatrix} V_{su} \\ V_{sv} \\ V_{so} \end{bmatrix} = [P(\theta_a)] \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_a) & \cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_a) & -\sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Le passage du système triphasé de tension rotorique **(abc)** au système triphasé rotorique (**uvo**) s'obtient à partir de la matrice de transformation de PARK $[P(\theta_b)]$. sachant que la composante homopolaire V_{ro} est nulle pour les systèmes triphasés équilibrés

$$\begin{bmatrix} V_{ru} \\ V_{rv} \\ V_{ro} \end{bmatrix} = [P(\theta_b)] \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_b) & \cos(\theta_b - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_b - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_b) & -\sin(\theta_b - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_b - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Le passage du repère **(abc)** au repère **(uv)** est applicable pour les tensions, les courants et les flux statoriques et rotoriques.

Après tout développement de calcul, le modèle électrique et magnétique équivalent de la machine dans le repère quelconque **(uv)** est donné par les systèmes d'équations suivants:

$$\begin{bmatrix} V_{su} \\ V_{sv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{su} \\ i_{sv} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{su} \\ \Phi_{sv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_a \\ \omega_a & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{su} \\ \Phi_{sv} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ru} \\ V_{rv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ru} \\ i_{rv} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ru} \\ \Phi_{rv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_a - \omega) \\ (\omega_a - \omega) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ru} \\ \Phi_{rv} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{su} \\ \Phi_{ru} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{su} \\ i_{ru} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sv} \\ \Phi_{rv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sv} \\ i_{rv} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Avec :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance propre cyclique du stator.

$L_r = l_r - M_r$: Inductance propre cyclique du rotor.

$M = \frac{3}{2} M_0$: Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

1- A partir du modèle de la machine asynchrone triphasé dans le repère (uv), déduire le modèle équivalent de la machine dans chacun des différents repères indiqués dans la figure 2. (On exige un calcul détaillé).

2- Est-il possible d'utiliser le modèle de la MAS dans le référentiel (α,β lié au stator) pour modéliser le défaut de type phase statorique ouverte (coupure de phase statorique). Justifier votre réponse.