



## Architectures segmentées d'alimentation à convertisseurs modulaires pour les actionneurs d'avion ; fonctionnement en modes dégradés

F. Meibody-Tabar\*, B. DAVAT\*, R. Meuret\*\*, S. Vieillard\*\*

\*GREEN-INPL, CNRS - UMR 7037

\*\* HISPANO-SUIZA, Groupe SNECMA

### Introduction

#### I- Architectures segmentées d'alimentation pour les actionneurs électriques :

- MSAP double-étoile alimentée par deux onduleurs triphasés
- MSAP triphasée alimentée par trois onduleurs monophasés

#### II- Modélisation – Conditions de sûreté d'alimentation

#### III- Extension de la segmentation de puissance à la source électrique

### Conclusion

## Introduction

Principaux objectifs d'utilisation d'actionneurs électriques sont :

- La réduction du coût d'exploitation par l'économie d'énergie :
  - Gain de poids,
  - Meilleure maîtrise de la puissance instantanée.
- L'amélioration des performances dynamiques

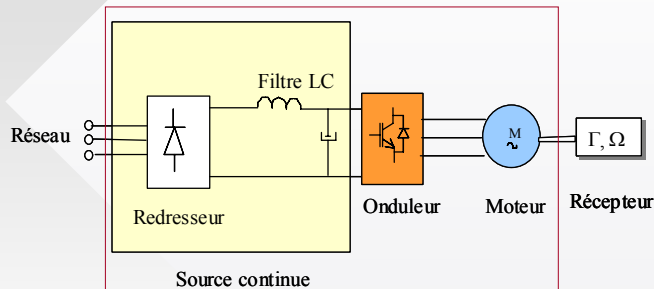
Pour que les actionneurs électriques puissent remplacer leurs homologues hydrauliques, ils doivent non seulement développer les mêmes performances, mais être aussi fiables.



Il faut considérer tous les problèmes qui peuvent survenir dans la chaîne de conversion électromécanique d'énergie : du réseau électrique jusqu'aux différents composants d'actionneurs.

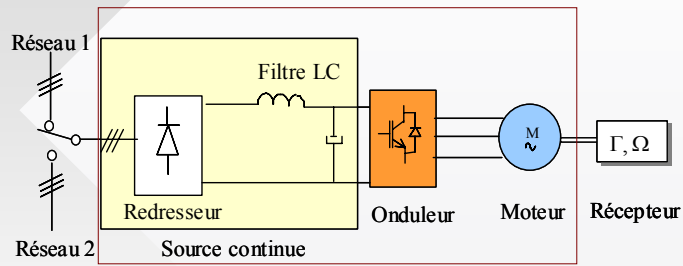
## Introduction

L'architecture classique d'un actionneur électrique connecté à un réseaux triphasé



Un défaut sévère, sur le réseau ou sur l'un des éléments de l'actionneur, peut à lui seul interrompre la conversion électromécanique.

## Introduction

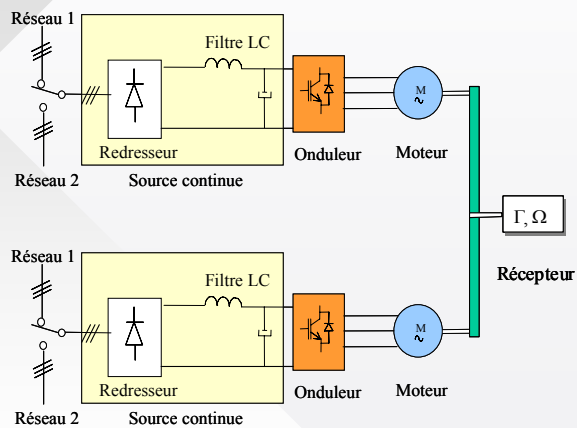


**En cas de coupures d'un réseau, il est possible d'alimenter l'actionneur par le deuxième.**

Par contre, en cas de défauts internes, le contrôle de l'actionneur est totalement ou partiellement mis en cause.

## Introduction

### 1<sup>ère</sup> Solution : Utiliser deux actionneurs identiques



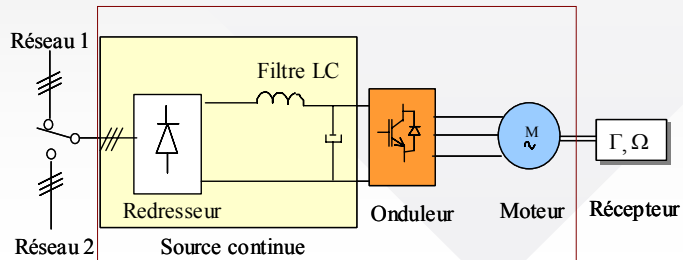
**Tous les composants de l'actionneur sont dédoublés, bien que la probabilité de défaut d'un élément soit fortement différente de celle des autres.**

## Introduction

2<sup>ème</sup> solution : Modifier l'architecture de la chaîne de conversion d'énergie en segmentant la puissance au niveau des organes à fort risque d'apparition de défaut :

**Remplacer un convertisseur par deux convertisseurs de même nature.**

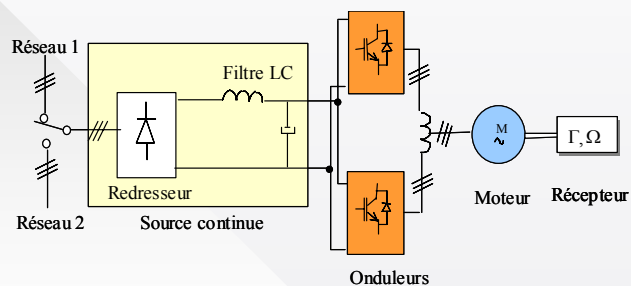
En pratique, les défauts concernant l'onduleur de tension et sa commande rapprochée peuvent être considérés comme étant les plus probables.



## I- Architectures segmentées

Deux approches de segmentation peuvent être envisagées :

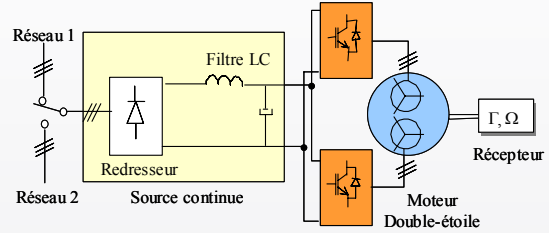
1. La segmentation de puissance uniquement au niveau du convertisseur électrique.



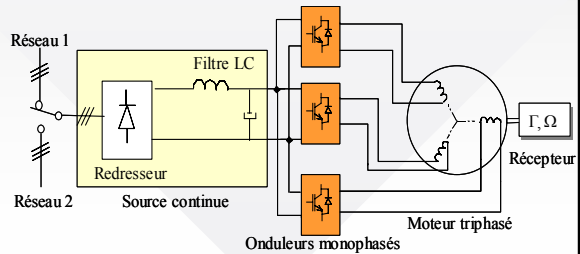
## I- Architectures segmentées

### 2. La segmentation de puissance au niveau du convertisseur électrique tout en modifiant la structure du convertisseur électromécanique :

- MSAP double-étoile dont chaque étoile est alimentée par un onduleur triphasé.



- MSAP triphasée dont chaque phase est alimentée par un onduleur monophasé.

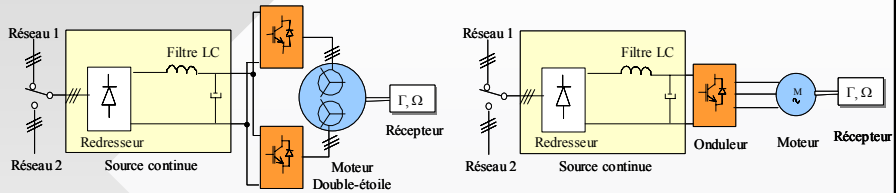


## I- Architectures segmentées

### Contraintes liées au couplage magnétique

Le formalisme de modélisation, développé dans le cadre du projet "Systèmes Multi-machine Multi-convertisseur" du GDR SDSE et ME<sup>2</sup>MS, permet de détecter facilement ces couplages et de déduire une commande adaptée.

## I- Architectures segmentées MSAP double-étoile



### Fonctionnement en mode normal

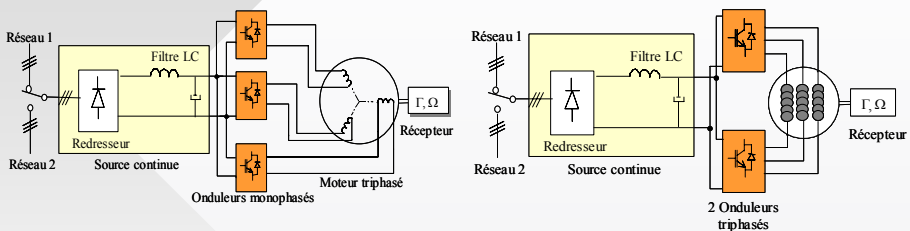
- La moitié de la puissance transite via chaque ensemble onduleur-étoile.
- La tension maximale imposée à chaque phase d'une machine double-étoile est identique à celle imposée à chaque phase d'une machine simple étoile.
- Pour la même puissance de sortie, le courant de phase d'une machine double-étoile est pratiquement la moitié du courant de phase d'une machine triphasée.

### Fonctionnement en mode dégradé

- En cas de défaut d'un onduleur, la machine peut fonctionner avec une étoile, alimentée par l'onduleur non-défectueux.

## I- Architectures segmentées-Machine triphasée

MSAP triphasée alimentée par trois onduleurs monophasés ou deux onduleurs triphasés.



### Fonctionnement en mode normal

L'amplitude du fondamental de la tension imposée à chaque phase peut atteindre le double de celle qu'impose un onduleur triphasé à une phase d'une machine triphasée montée en étoile.

- A puissance donnée, on peut doubler le nombre de spires des bobines statoriques et diviser par deux le courant de phase et donc le courant dans les composants des onduleurs.

### Fonctionnement en mode dégradé

- En cas de défaut d'un onduleur monophasé, plusieurs stratégies de fonctionnement en mode dégradé peuvent être envisagées.

## I- Architectures segmentées-Machine triphasée

**Les avantages des machines à architecture segmentées d'alimentation :**

- redondance
- utilisation de convertisseurs modulaires

**Augmentation de l'ordre du système :**

- quatre dans une machine double-étoile
- trois dans une machine à trois phases séparément alimentées

**Comment contrôler les courants des MSAP double-étoile ou triphasée alimentées par des onduleurs de tension ?**

## II- Modélisation - sûreté d'alimentation des MSAP double-étoile ou triphasée

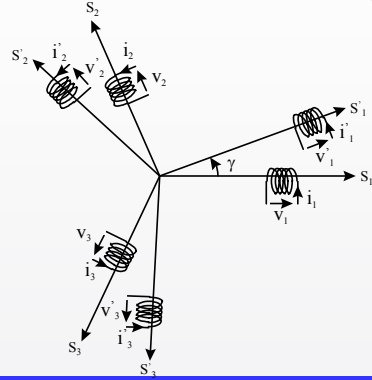
**Hypothèses de modélisation :**

- le circuit magnétique n'est pas saturé,
- le phénomène d'amortissement au rotor est négligeable,
- les pertes par hystérésis et par courants de Foucault au stator sont négligées,
- les courants capacitifs sont négligeables,
- la répartition des conducteurs des bobines statoriques et donc les fém de phases sont sinusoïdales,
- le rotor est supposé lisse.

## II-1 Modélisation - sûreté d'alimentation des MSAP double-étoile

- $l_p$  inductance propre d'un enroulement,
- $m \cdot \cos(\xi)$  mutuelle entre deux enroulements du stator, décalés entre eux d'un angle électrique  $\xi$ .

$$\begin{cases} v_k = r \cdot i_k + \frac{d\phi_k}{dt} + e_k \\ v'_k = r \cdot i'_k + \frac{d\phi'_k}{dt} + e'_k \\ \phi_k = (l_p + \frac{m}{2})i_k + \frac{3m}{2} \cdot \cos(\gamma) i'_k - \frac{m\sqrt{3}}{2} \cdot \sin(\gamma) [i'_{k+1} - i'_{k+2}] \\ \phi'_k = (l_p + \frac{m}{2})i'_k + \frac{3m}{2} \cdot \cos(\gamma) i_k + \frac{m\sqrt{3}}{2} \cdot \sin(\gamma) [i_{k+1} - i_{k+2}] \end{cases}$$

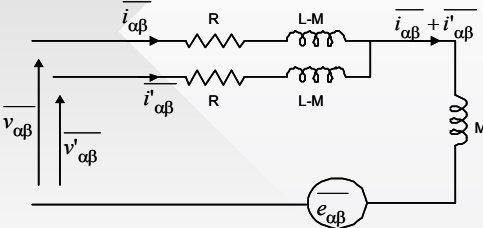


- Chaque étoile statorique peut être remplacée par un bobinage diphasé équivalent,
- Afin d'exprimer, dans le même référentiel, les différentes grandeurs associées aux deux étoiles, on applique à celles-ci les transformations "triphasée-diphasée".

$$\begin{cases} [G_{\alpha\beta}] = T'_{32} [G_{1,2,3}] \\ [G'_{\alpha\beta}] = P(\gamma) \cdot T'_{32} [G_{1,2,3}] = [T'_{32}(\gamma)] [G_{1,2,3}] \end{cases} \quad [T'_{32}(\gamma)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\gamma + \frac{4\pi}{3}) \\ \sin(\gamma) & \sin(\gamma + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\gamma + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

## II-1 Modélisation - sûreté d'alimentation des MSAP double-étoile

$$\begin{cases} \bar{v}_{\alpha\beta} = R \bar{i}_{\alpha\beta} + (L-M) \cdot \frac{d\bar{i}_{\alpha\beta}}{dt} + M \cdot \frac{d(\bar{i}_{\alpha\beta} + \bar{i}'_{\alpha\beta})}{dt} + \bar{e}_{\alpha\beta} \\ \bar{v}'_{\alpha\beta} = R \bar{i}'_{\alpha\beta} + (L-M) \cdot \frac{d\bar{i}'_{\alpha\beta}}{dt} + M \cdot \frac{d(\bar{i}_{\alpha\beta} + \bar{i}'_{\alpha\beta})}{dt} + \bar{e}'_{\alpha\beta} \end{cases}$$



- $i_{\alpha}^+$  et  $i_{\beta}^+$  contiennent le fondamental du courant et certains harmoniques, et ils contribuent à la création du couple.
- $i_{\alpha}^-$  et  $i_{\beta}^-$  contiennent d'autres harmoniques. Ces composantes créent des pertes Joule mais ne participent pas à la génération du couple.

$$\begin{aligned} \bar{G}_{\alpha\beta} &= G_{\alpha} + j G_{\beta} \\ R &= r \quad L = l_s + \frac{m}{2} \quad M = \frac{3}{2} \cdot m \\ e'_{\alpha} &= e_{\alpha} \quad e'_{\beta} = e_{\beta} \quad \bar{e}_{\alpha\beta} = \bar{e}'_{\alpha\beta} \end{aligned}$$

$$\Gamma = \frac{p}{\omega} [e_{\alpha} (i_{\alpha} + i'_{\alpha}) + e_{\beta} (i_{\beta} + i'_{\beta})]$$

$$\begin{bmatrix} \bar{G}_{\alpha\beta}^+ \\ \bar{G}_{\alpha\beta}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{G}_{\alpha\beta} \\ \bar{G}'_{\alpha\beta} \end{bmatrix}$$

$$\bar{v}_{\alpha\beta}^+ = R \bar{i}_{\alpha\beta}^+ + (L+M) \cdot \frac{d\bar{i}_{\alpha\beta}^+}{dt} + \bar{e}_{\alpha\beta}^+$$

$$\bar{v}_{\alpha\beta}^- = R \bar{i}_{\alpha\beta}^- + (L-M) \cdot \frac{d\bar{i}_{\alpha\beta}^-}{dt}$$

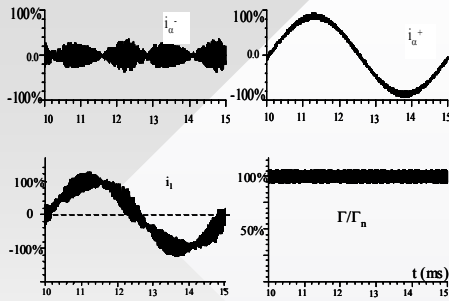
$$\bar{e}_{\alpha\beta}^+ = \bar{e}_{\alpha\beta} \cdot \sqrt{2} \quad \bar{e}_{\alpha\beta}^- = 0$$

$$L+M = l_p + 2m \quad L-M = l_p - m$$

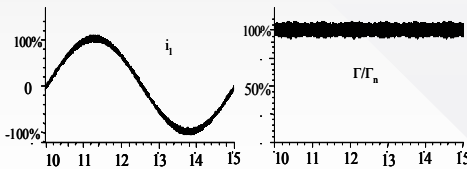
$$\Gamma = \frac{p}{\omega} (e_{\alpha}^+ i_{\alpha}^+ + e_{\beta}^+ i_{\beta}^+)$$



## II-1 Modélisation - sûreté d'alimentation des MSAP double-étoile



Résultats concernant une MSAP à deux étoiles décalées ( $\gamma = 30^\circ$ ) fortement couplées.



Courant et couple de la machine à deux étoiles non décalées ( $\gamma = 0^\circ$ ).

La sûreté de l'alimentation d'une machine double-étoile par deux onduleurs de tension est liée d'une part au décalage entre les étoiles, et d'autre part, au degré de couplage de ces étoiles :

- Etoiles non-décalées
- Inductance de fuite suffisante

En mode dégradé, avec une étoile non-alimentée, la forme de fém des phases de l'étoile restant active n'est pas modifiée, et la même qualité de couple qu'en mode normal peut être atteinte, sans changer la forme de courant dans les phases de l'étoile active.

## II-2 Modélisation - sûreté d'alimentation des MSAP triphasée

Les équations de tension et de couple :

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_p & M & M \\ M & L_p & M \\ M & M & L_p \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix}$$

$$\Gamma = \frac{1}{\Omega} \sum_{j=1}^3 e_j \cdot i_j$$

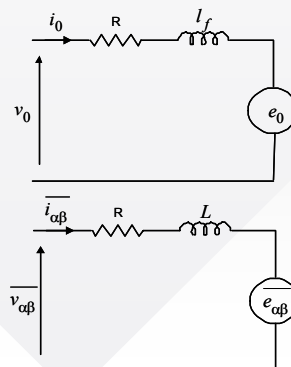
$$\begin{cases} L_p = l_f + m \\ M = m \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi}{3} = -\frac{m}{2} \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_f & 0 & 0 \\ 0 & l_f + \frac{3}{2}m & 0 \\ 0 & 0 & l_f + \frac{3}{2}m \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_0 = 0 \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{pmatrix}$$

$$\Gamma = \frac{1}{\Omega} [e_0 \cdot i_0 + (e_\alpha \cdot i_\alpha + e_\beta \cdot i_\beta)] = \frac{1}{\Omega} (e_\alpha \cdot i_\alpha + e_\beta \cdot i_\beta)$$

L'application de la transformation de Concordia diagonalise le système d'équation :

$$\begin{pmatrix} g_0 \\ g_\alpha \\ g_\beta \end{pmatrix} = [T_{33}]^t \cdot \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{pmatrix}$$

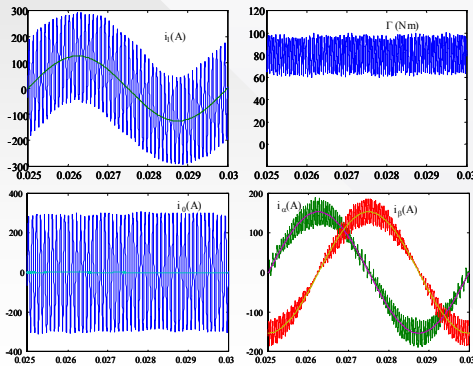


## II-2 Modélisation - sûreté d'alimentation des MSAP triphasée

Les trois onduleurs ne peuvent donc imposer que  $3^3$  vecteurs tension distincts dont seuls sept sont à composante homopolaire nulle.

- La commande indépendante des onduleurs conduit à imposer aléatoirement à la machine des tensions à composante homopolaire positive, nulle ou négative.

- La *machine fictive homopolaire* est alors excitée et le courant  $i_0$  se manifeste sous forme de surintensité dans les courants de phases.



Pour limiter le taux d'ondulation de courant, il est nécessaire de concevoir des MSAP à inductance de fuite suffisante.

Courants et couple de la MSAP triphasée à faible inductance de fuite

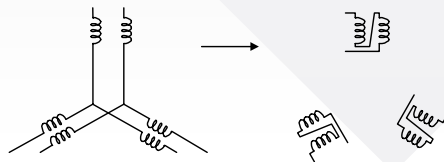
## II-3 Comparaison des actionneurs munis de MSAP double-étoile et triphasée

Points communs :

- Le faible couplage magnétique, entre les étoiles ou entre les phases, facilite la commande, réduit les pertes et améliore la sûreté de fonctionnement
- Les onduleurs alimentant les deux machines ont le même nombre de composants et sont soumis aux mêmes contraintes en courant et en tension.
- Les deux structures peuvent fonctionner en mode dégradé, en l'absence d'alimentation d'une étoile ou d'une phase.

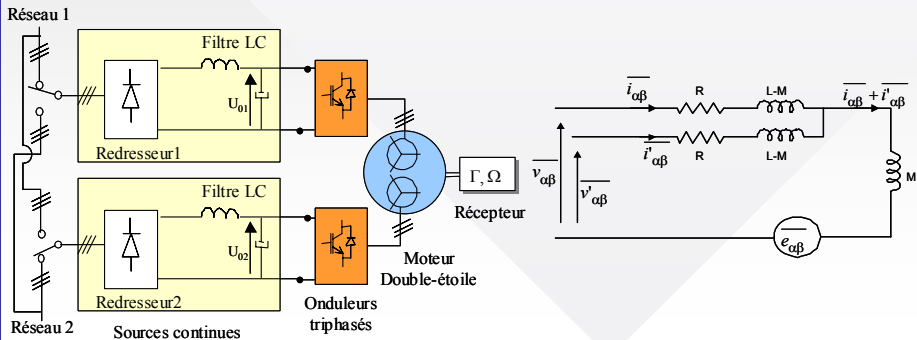
Différences :

- La tension nominale de la machine triphasée est double de celle de la machine double-étoile mais la valeur nominale des courants est la même.
- Pour le contrôle du couple d'une machine double-étoile quatre boucles de courant sont nécessaires ; tandis qu'il en faut trois avec une machine triphasée (un capteur de moins).
- En mode dégradé, avec une machine double-étoile la forme de courant des phases de l'étoile restant active n'est pas modifiée.



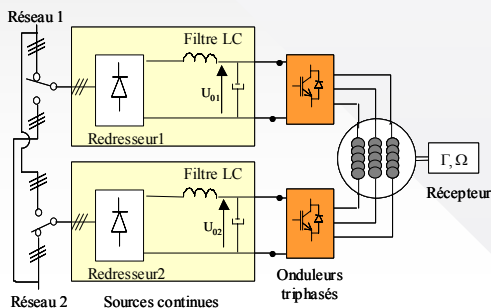
### III Extension de la segmentation de puissance à la source électrique – MSAP double-étoile

- Lorsqu'il existe deux réseaux indépendants, on peut étendre la segmentation de puissance à la source électrique.
- Pour éviter un taux d'ondulation de courant élevé, les deux sources continues doivent avoir la même tension.
- En présence de défauts sur une chaîne de conversion d'énergie, l'autre chaîne permet de fonctionner presque normalement : surdimensionnement en courant.
- Un actionneur, muni d'une machine à deux étoiles faiblement couplées, peut être considéré comme équivalent à deux actionneurs identiques.
- Son utilisation est justifiée par le poids plus faible d'une machine double étoile comparé à celui de deux machines triphasées de puissance moitié.



### III Extension de la segmentation de puissance à la source électrique – MSAP triphasée

- Lorsqu'il existe deux réseaux électriquement isolés (transformateur double secondaire), la somme des courants des phases est nulle.
  - En mode normal : moins de pertes, notamment à basse vitesse.
  - En présence de défauts : la stratégie la mieux adaptée est fortement dépendante de la nature du défaut et de sa localisation.
 On peut également utiliser des disjoncteurs pour reconfigurer l'architecture d'alimentation ou la connexion des bobines.
- Avec deux réseaux non-isolés (deux réseaux triphasés à neutres connectés à la masse), pour éviter un courant de masse, il vaut mieux connecter les sources continues.



## Conclusion

Les machines synchrones à aimants permanents, double-étoile ou triphasée, à faible couplage magnétique entre les étoiles ou entre les phases, autorisent une alimentation segmentée par onduleurs de tension connectés à la même source continue.

- En cas de défaut d'un onduleur, l'actionneur peut continuer à fonctionner en mode dégradé.
- En sur-dimensionnant les onduleurs en courant, il est possible de tirer en mode dégradé les mêmes performances qu'en mode normal.

- Pour les deux structures étudiées, l'extension de la segmentation de puissance à la source continue, au prix de l'ajout d'un deuxième ensemble redresseur-filtre, accroît le degré de fiabilité de l'actionneur.
- En présence de défauts sur l'une des deux chaînes d'alimentation d'une machine double-étoile, l'autre chaîne permet un fonctionnement presque normal.