

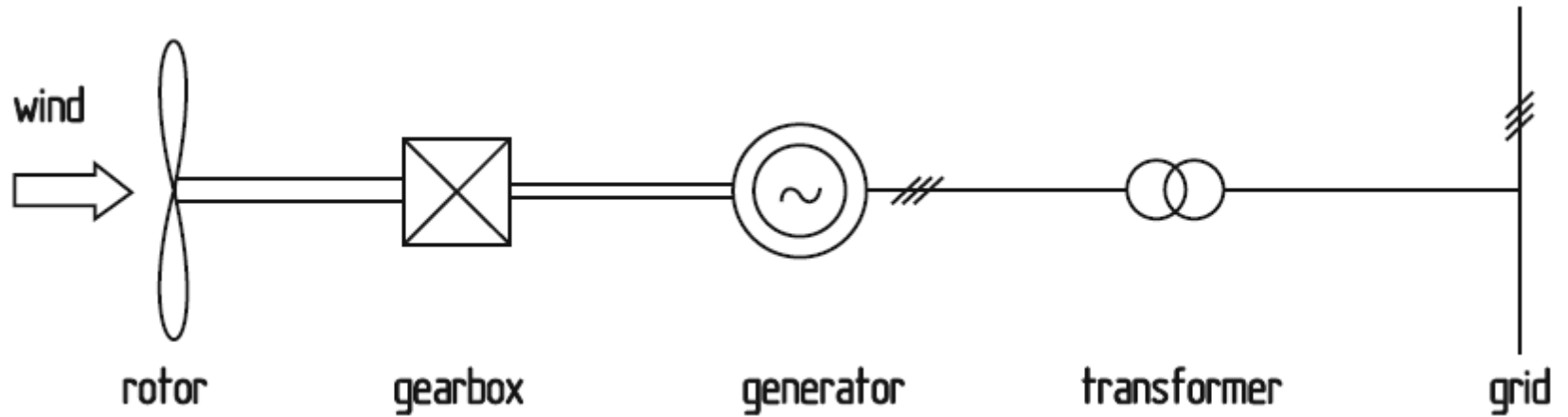
Energie éolienne

Aspects électriques



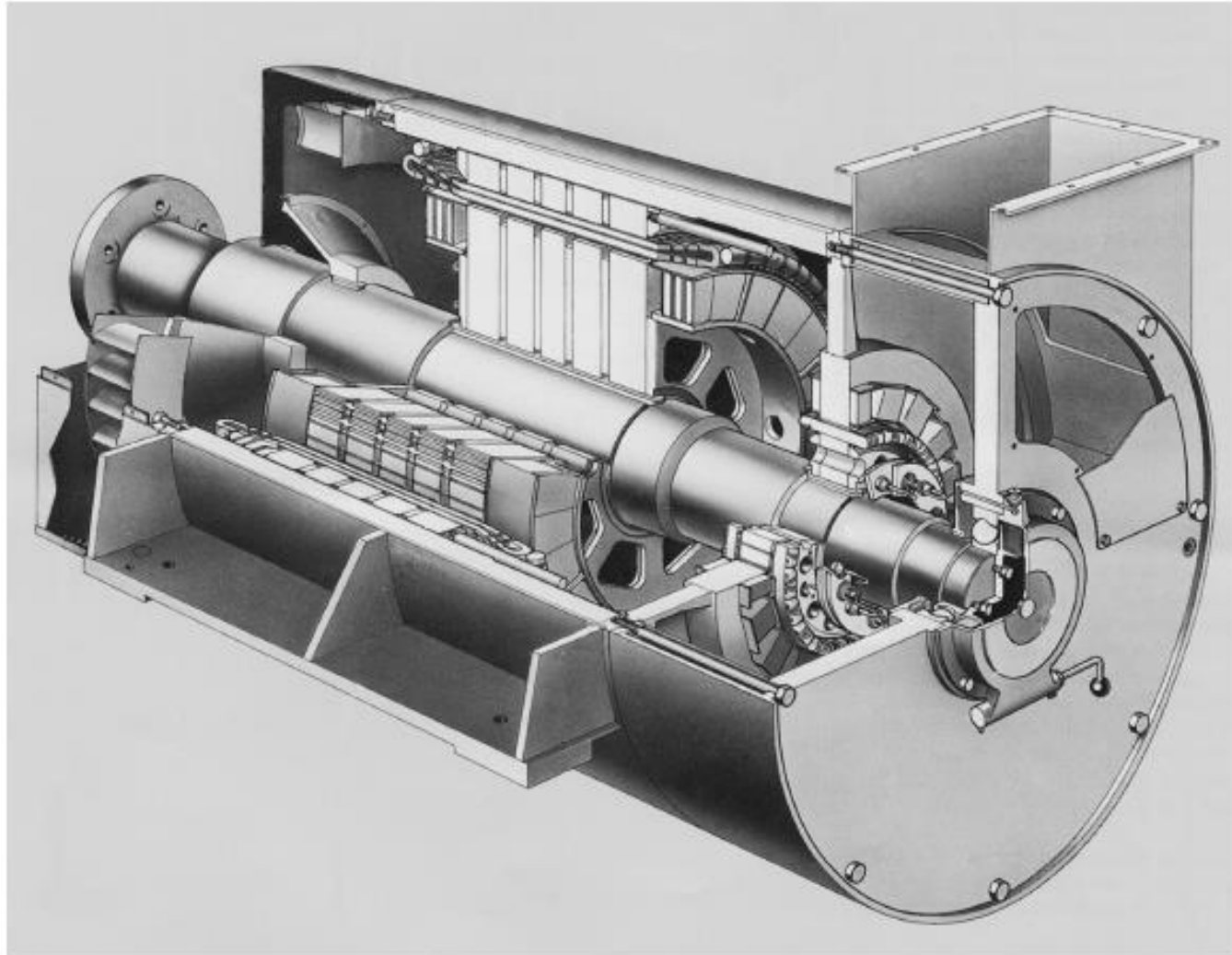
Energie éolienne

Aspects électriques



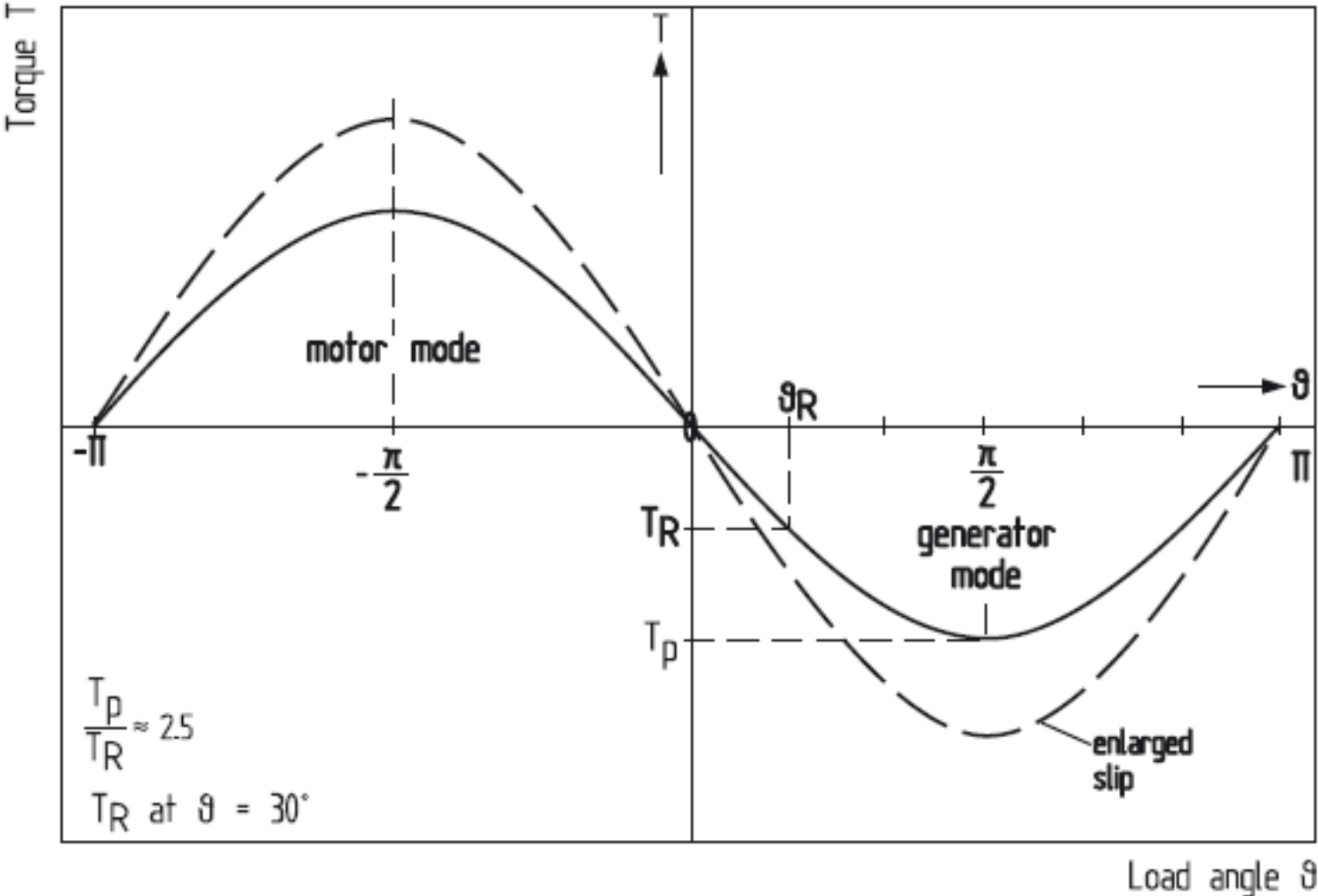
Energie éolienne: convertisseurs électromécaniques

Machine synchrone



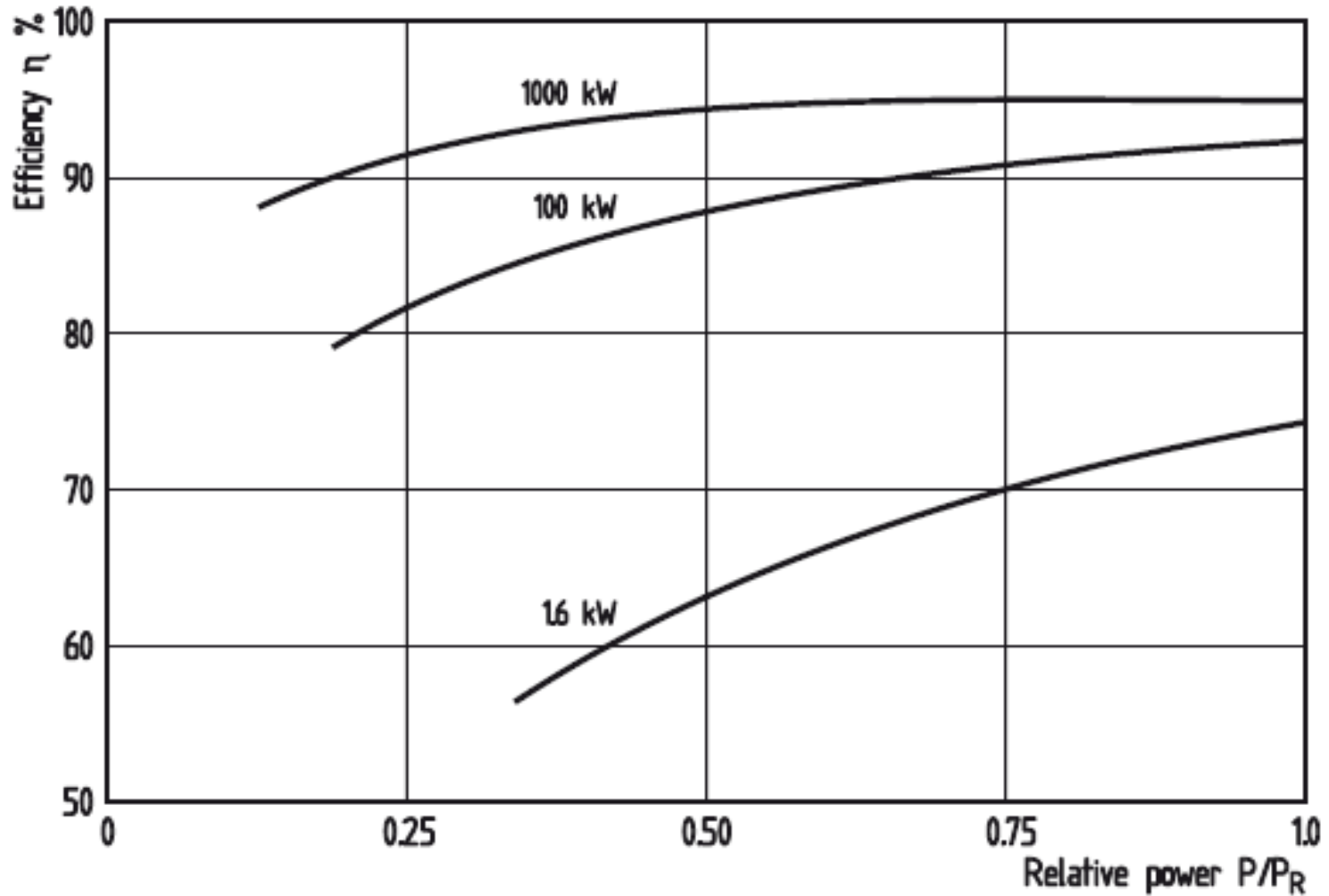
Energie éolienne: convertisseurs électromécaniques

Machine synchrone



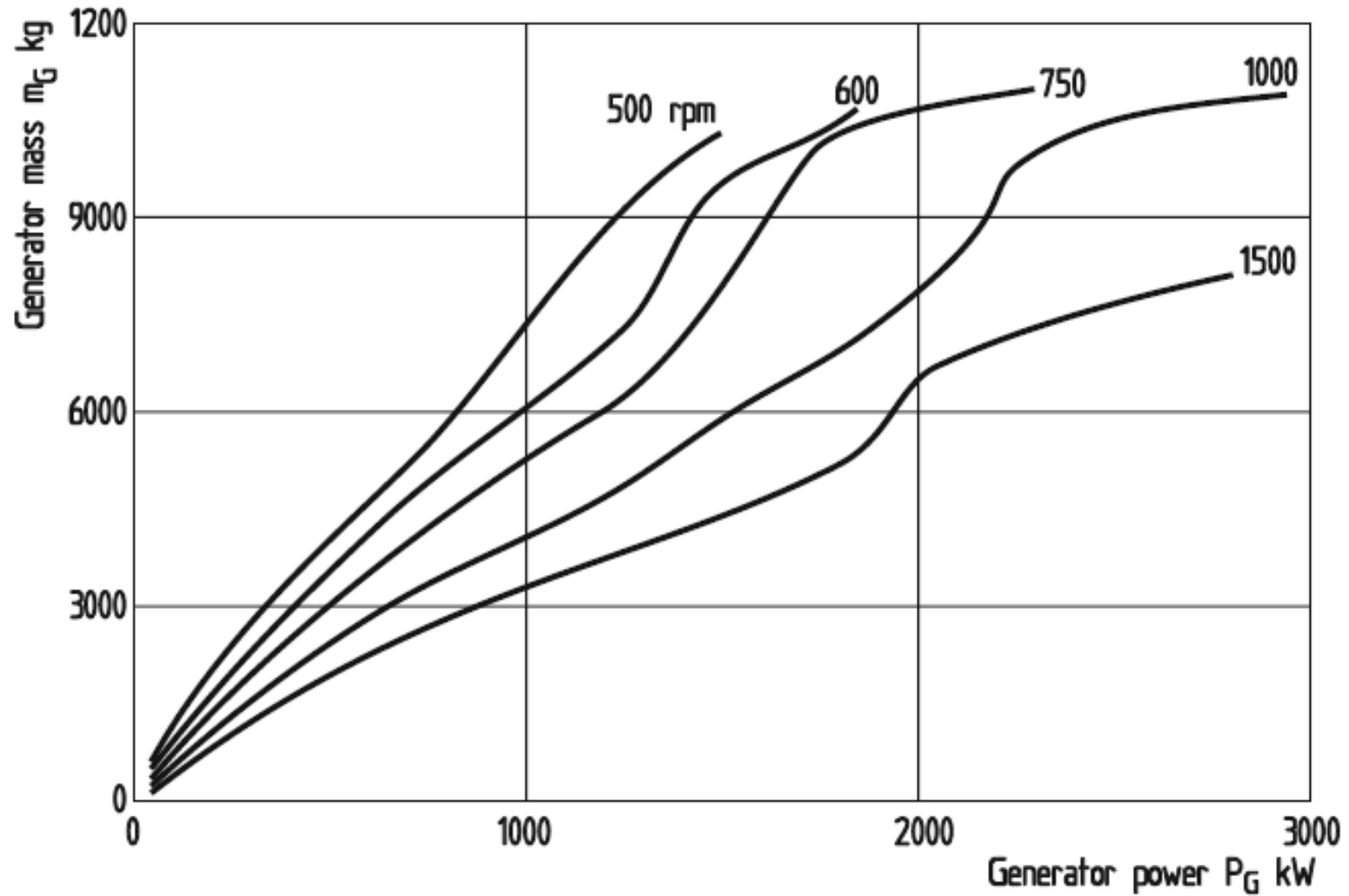
Energie éolienne: convertisseurs électromécaniques

Machine synchrone



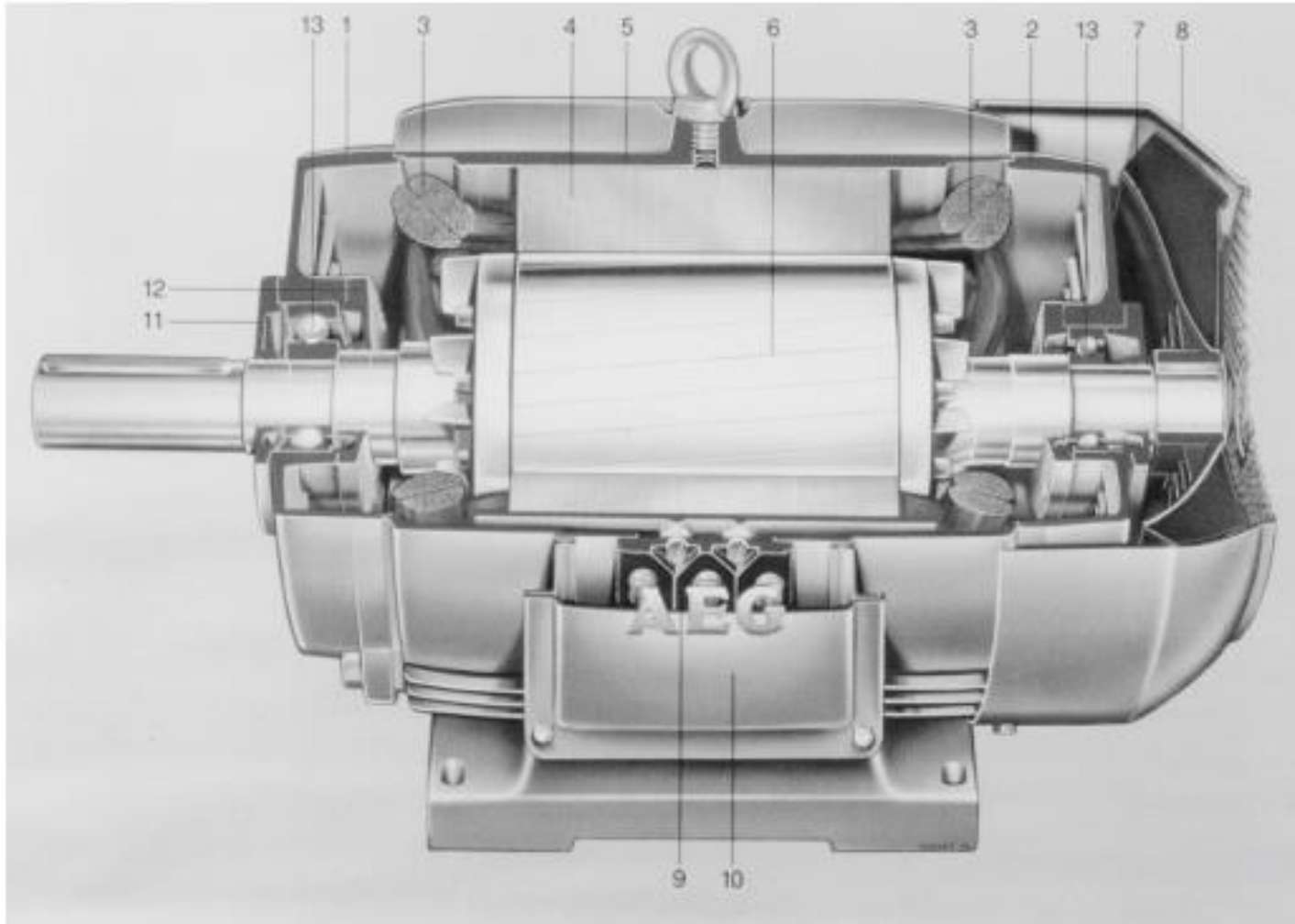
Energie éolienne: convertisseurs électromécaniques

Machine synchrone



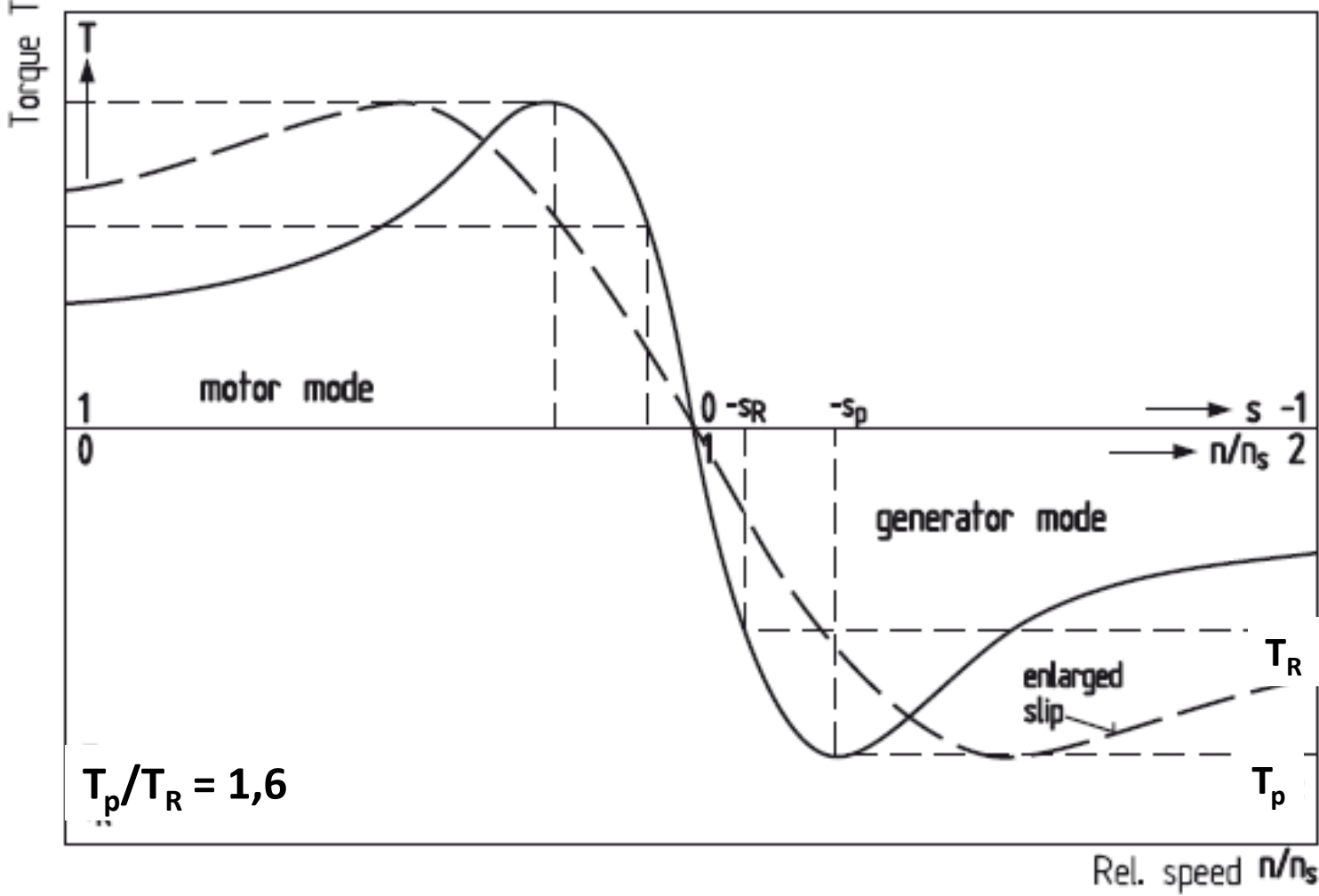
Energie éolienne: convertisseurs électromécaniques

Machine asynchrone (machine à induction)



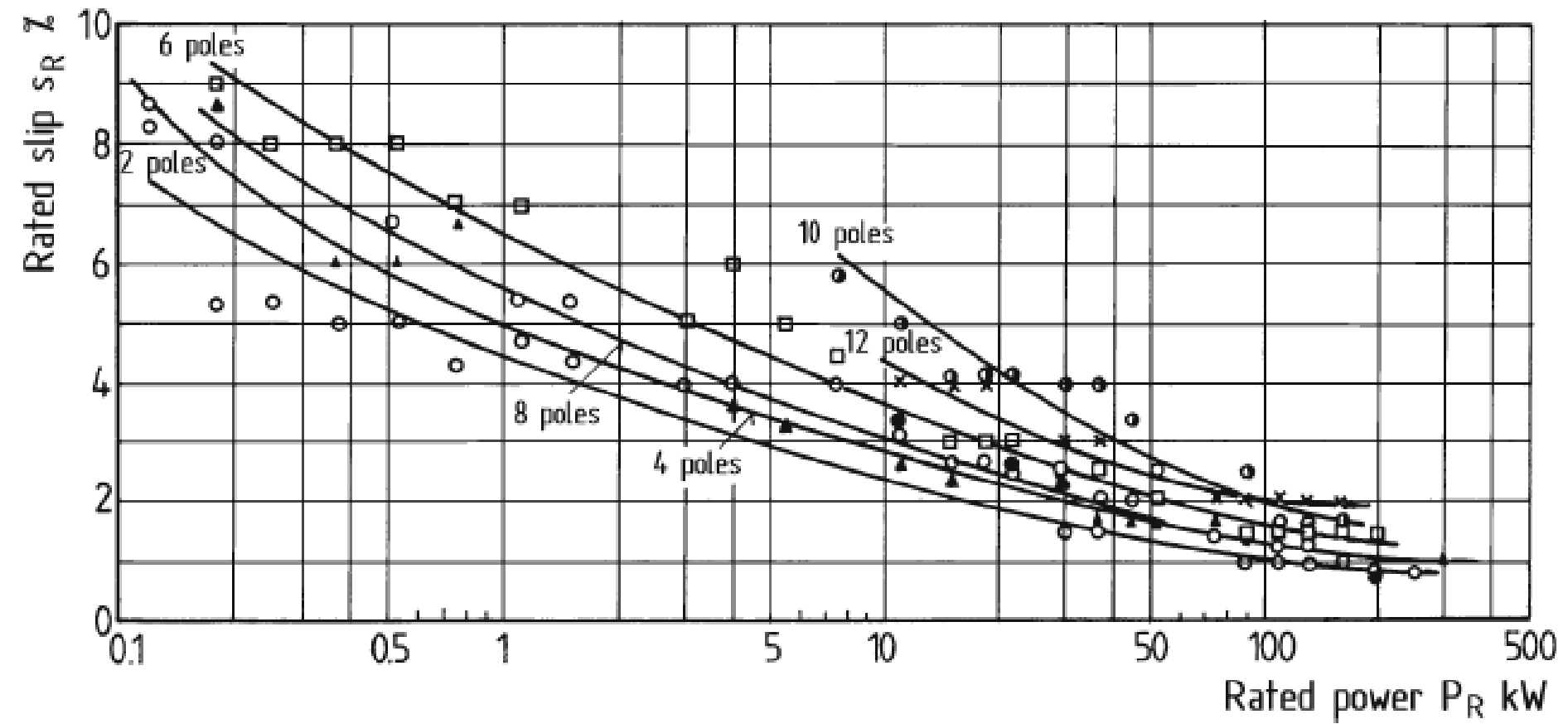
Energie éolienne: convertisseurs électromécaniques

Machine asynchrone (machine à induction)



Energie éolienne: convertisseurs électromécaniques

Machine asynchrone (machine à induction)



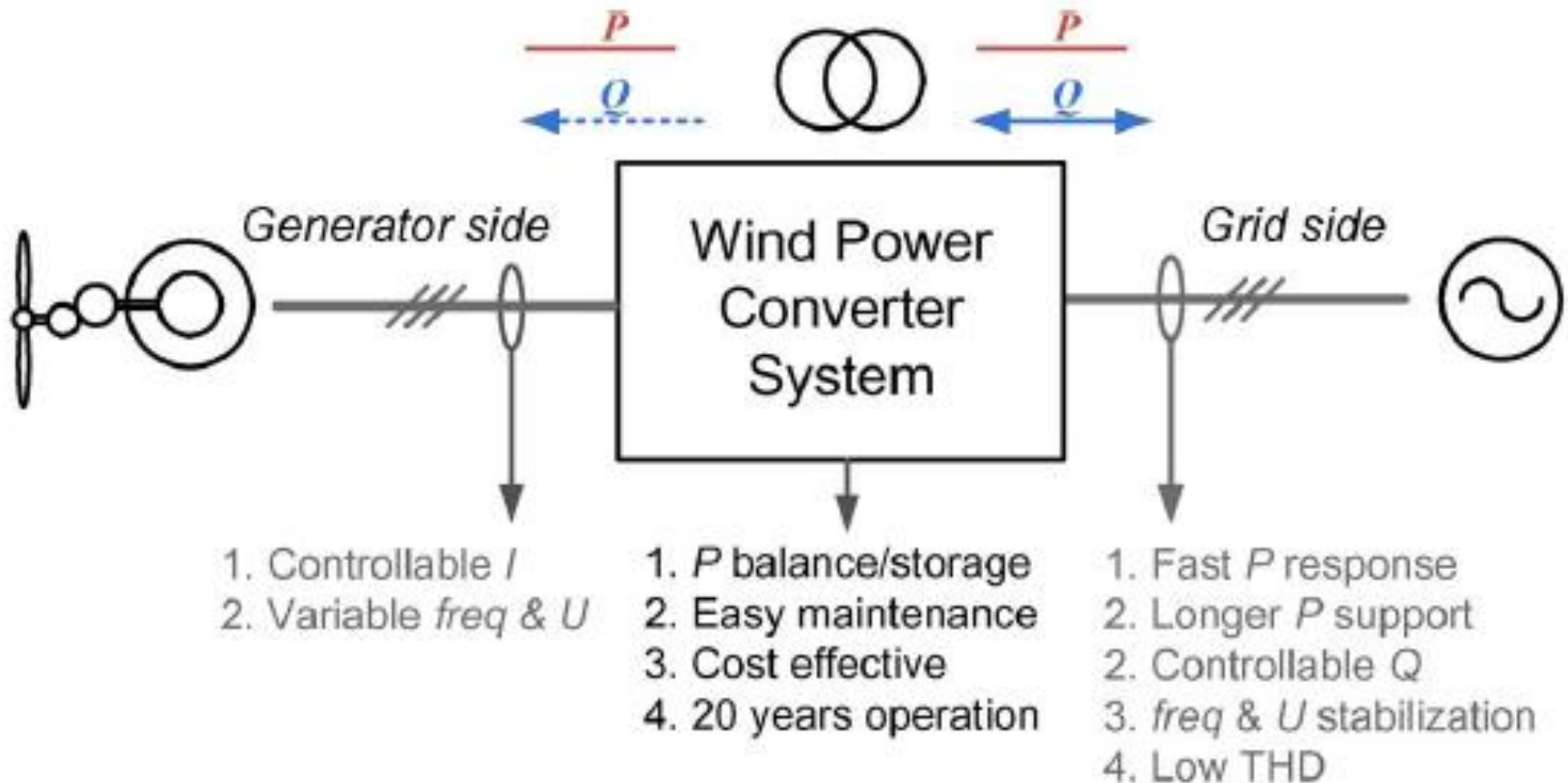
Choix d'un type de générateur éolien ?

- Réponse dynamique en fonction de la vitesse
- Plage de vitesse souhaitable
- Contrôlabilité
- Puissance réactive et réglage de la tension
- Qualité de la tension
- Synchronisation, connexion et déconnexion

Choix d'un type de générateur éolien ? (suite)

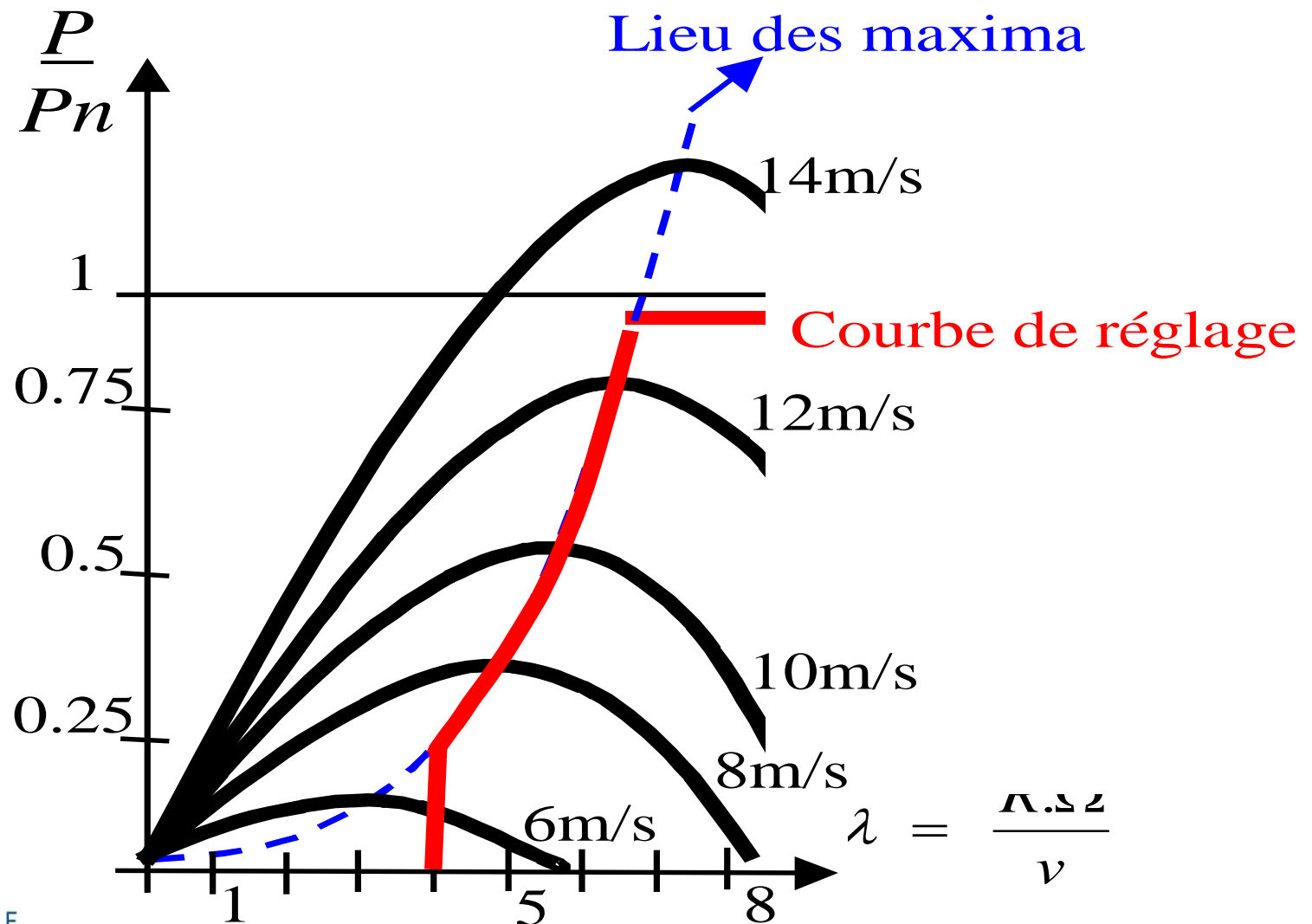
- Rendement
- Coûts fixes
- Coûts variables, fiabilité

Choix d'un type de générateur éolien ? (suite)

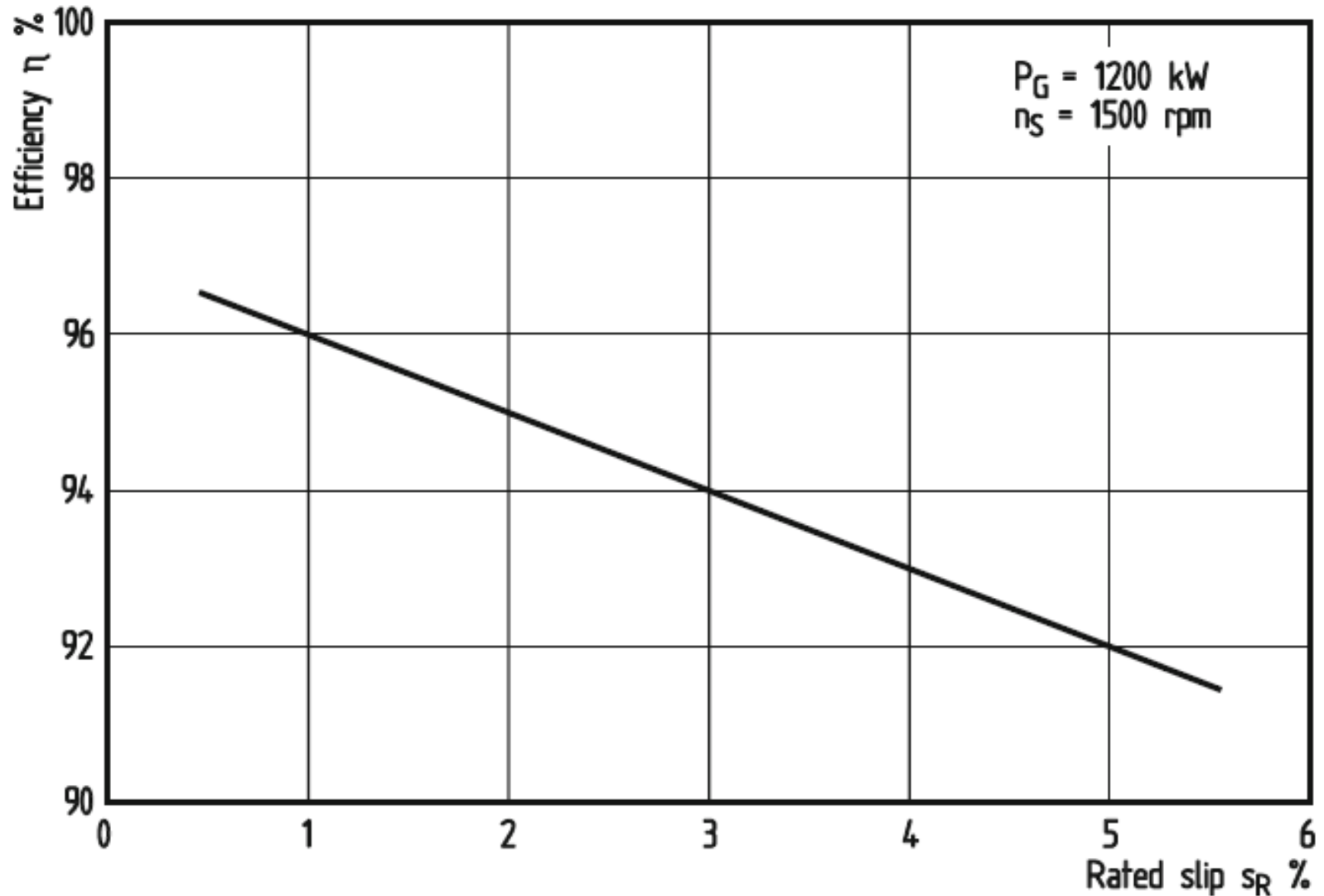


Génératrices à vitesse variable

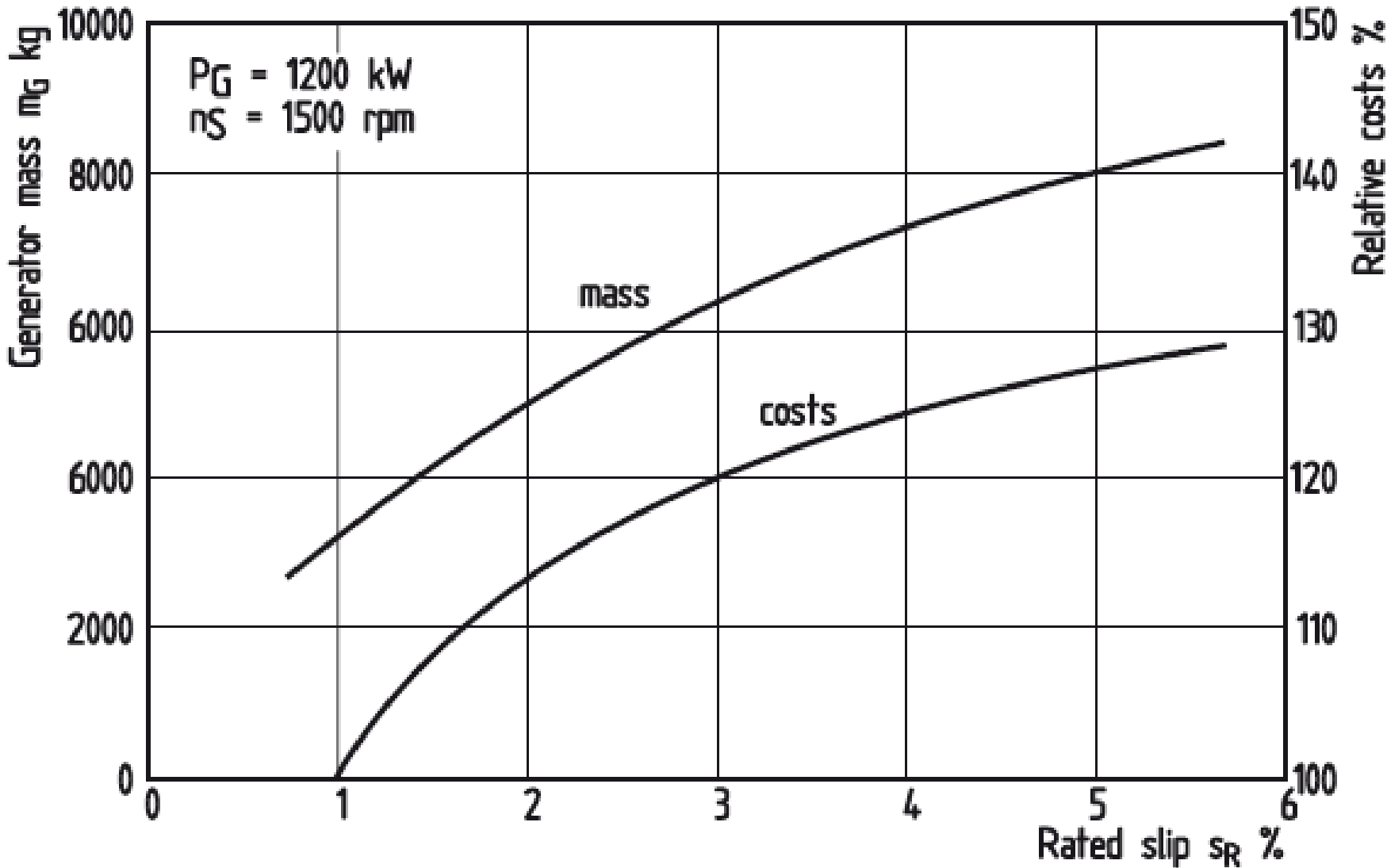
⇒ Maximum Power Point Tracking (MPPT)



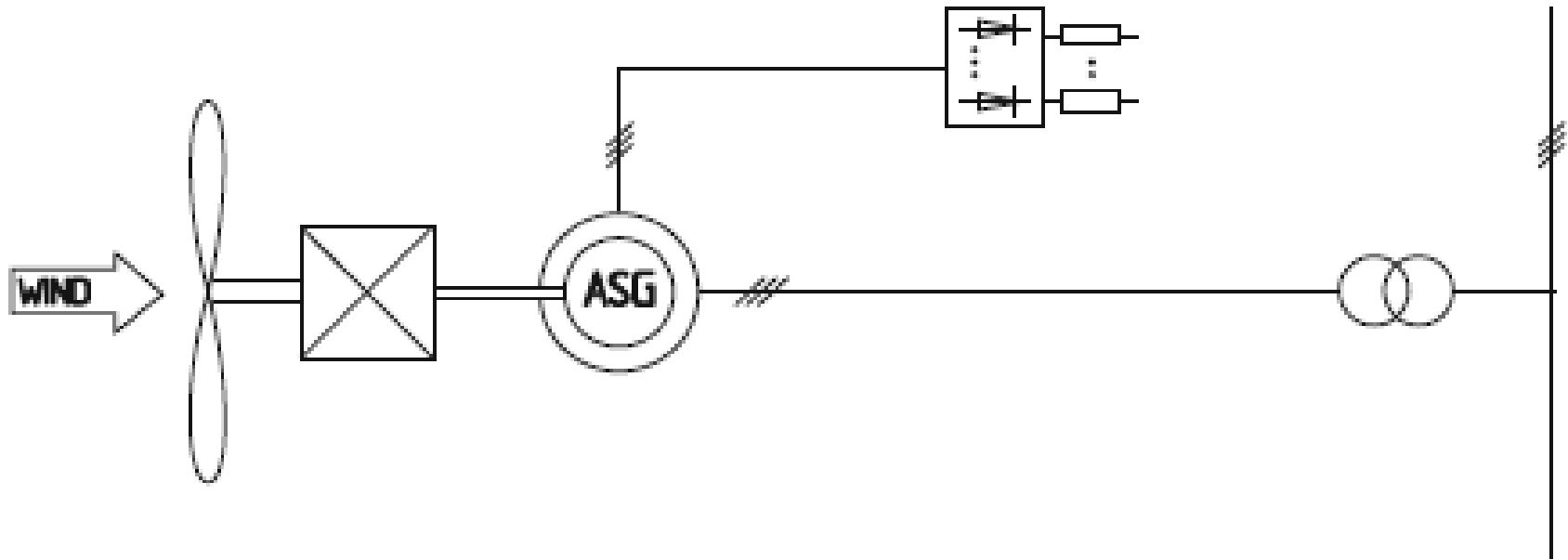
Machine asynchrone directement couplée au réseau



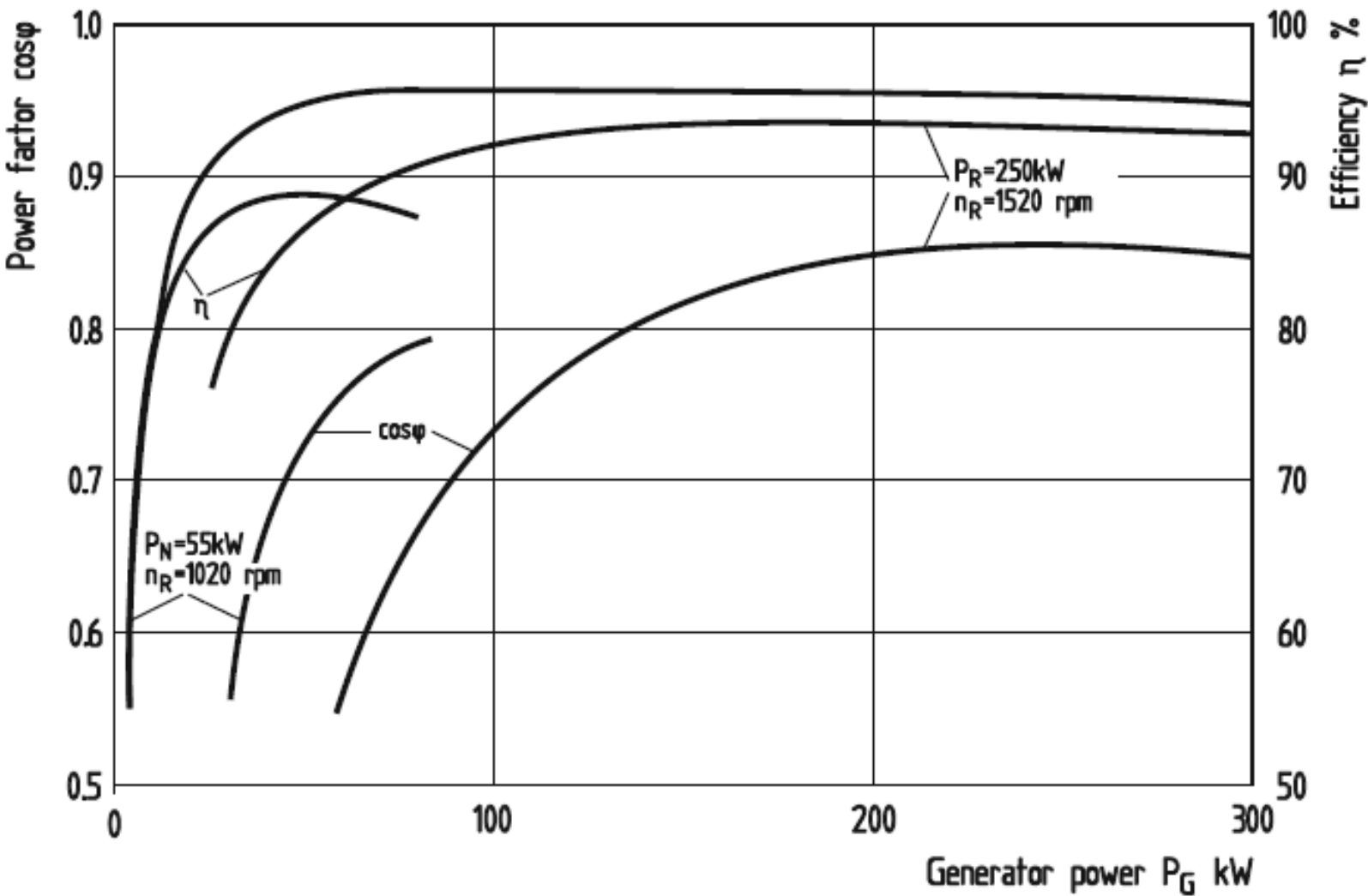
Machine asynchrone directement couplée au réseau



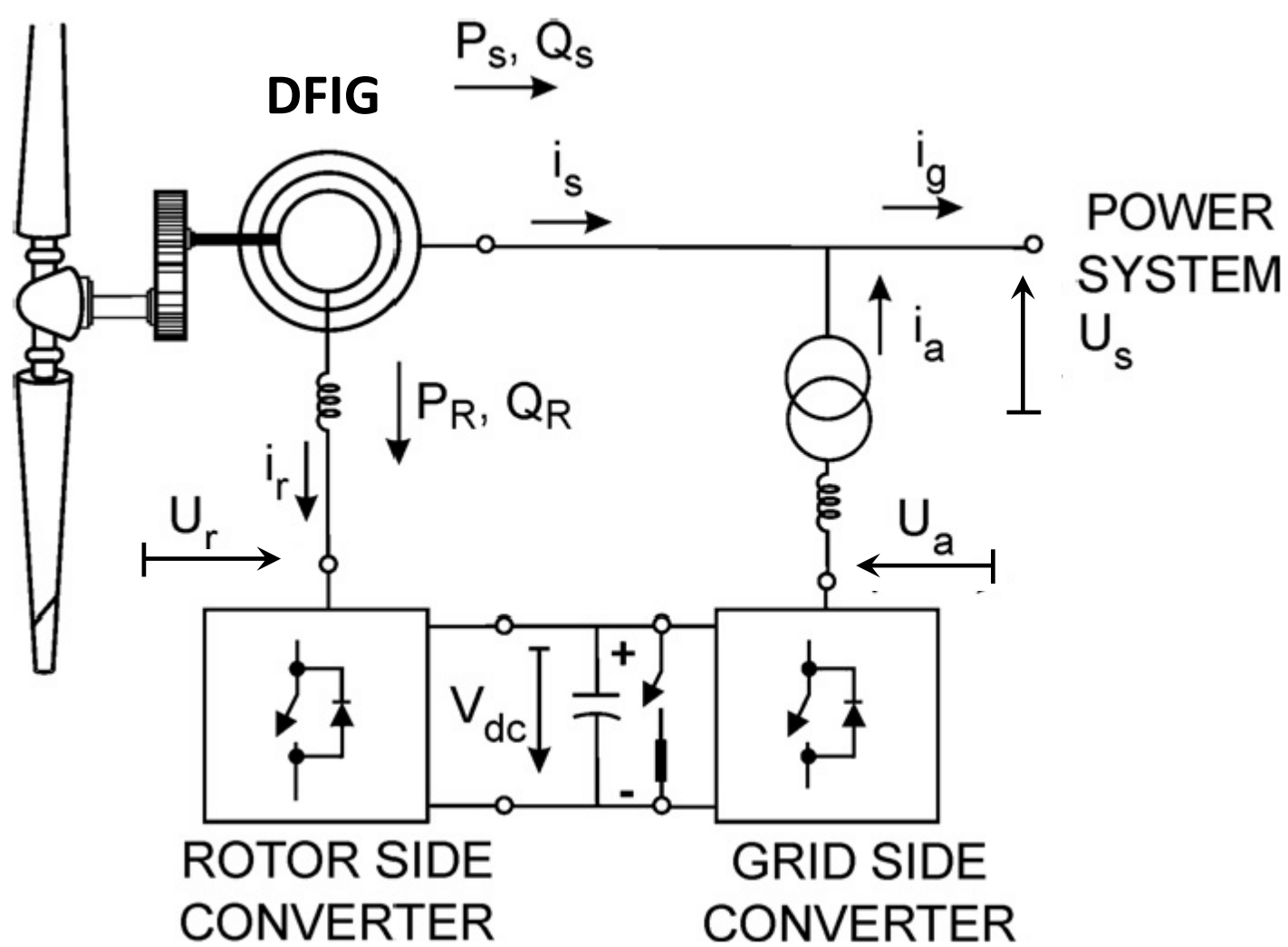
Machine asynchrone avec résistance rotorique variable (réglable)

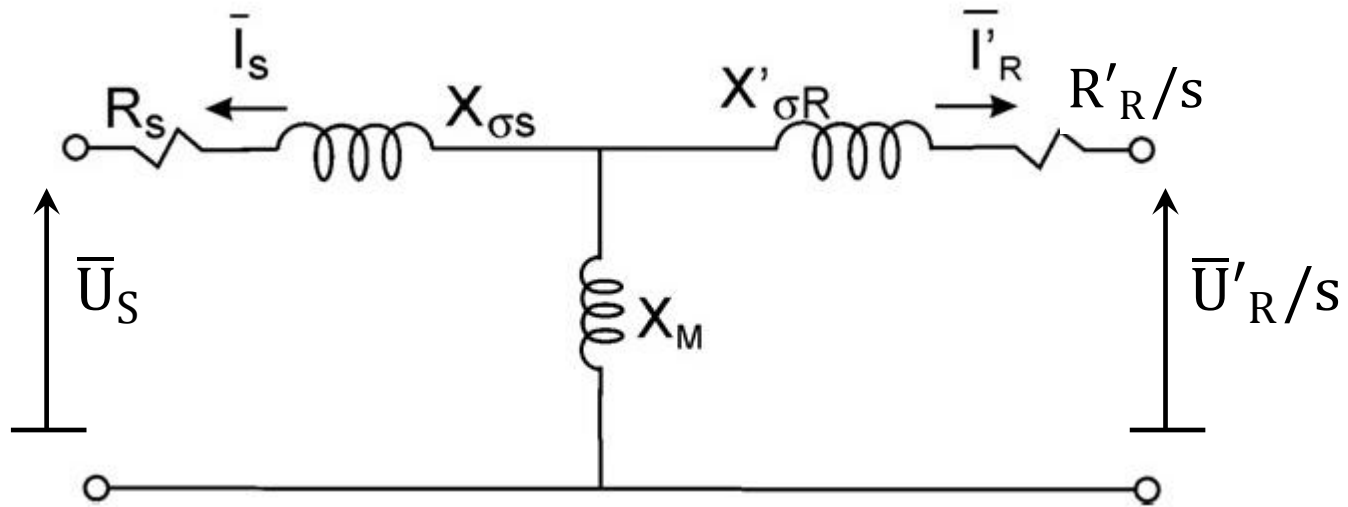


Machine asynchrone multi-stator



Machine asynchrone à double alimentation



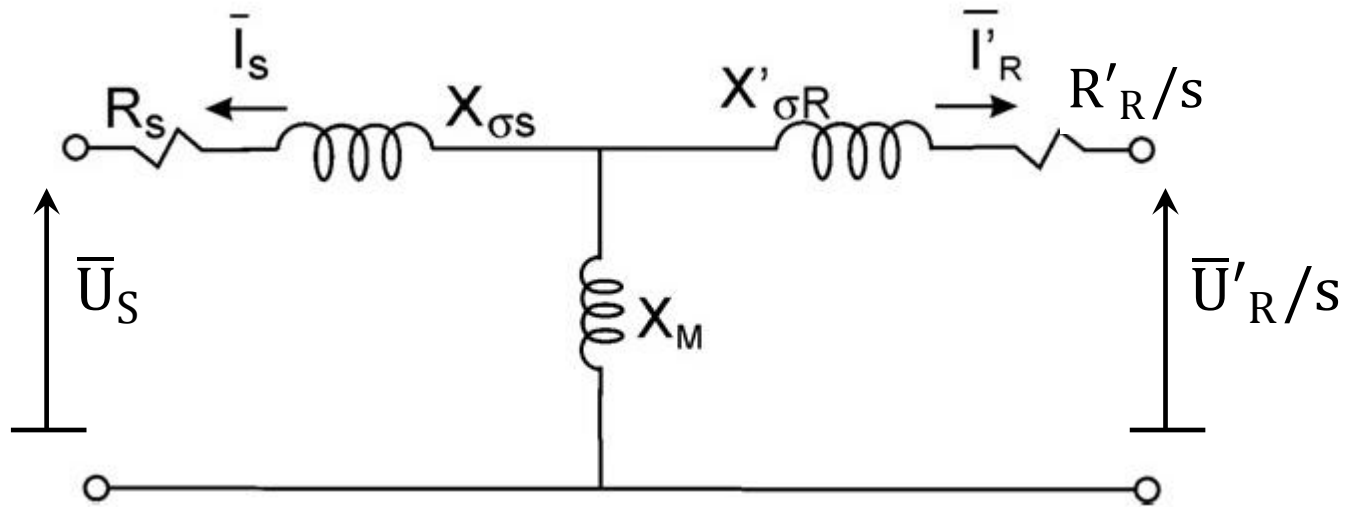


$$\bar{U}_S = -R_S \bar{I}_S - jX_S \bar{I}_S - jX_M \bar{I}'_R$$

$$s = \frac{\omega_R}{\omega_S}$$

$$\bar{U}'_R = -R'_R \bar{I}'_R - jsX'_R \bar{I}'_R - jsX_M \bar{I}_S$$

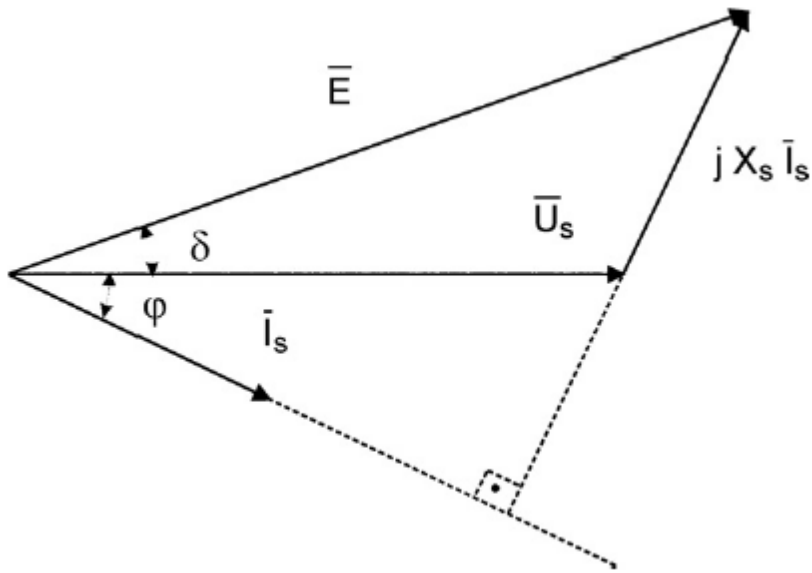
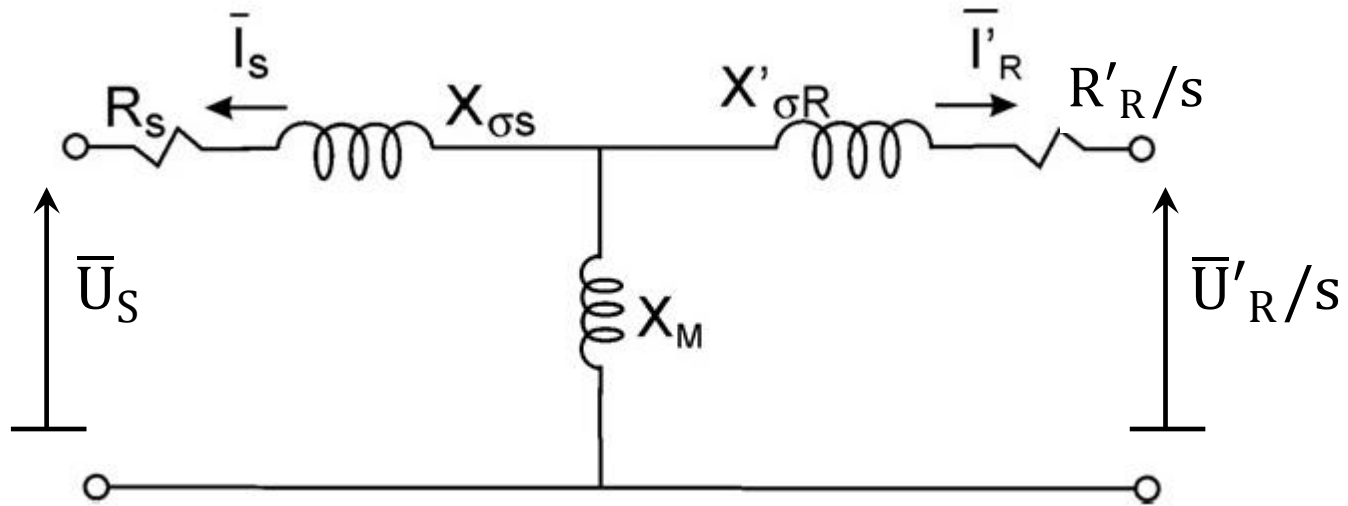
$$\frac{\bar{U}'_R}{s} = -\frac{R'_R}{s} \bar{I}'_R - jX'_R \bar{I}'_R - jX_M \bar{I}_S$$



$$\bar{E} = -jX_M \bar{I}'_R$$

$$\bar{U}_S = -R_s \bar{I}_S - jX_s \bar{I}_S + \bar{E}$$

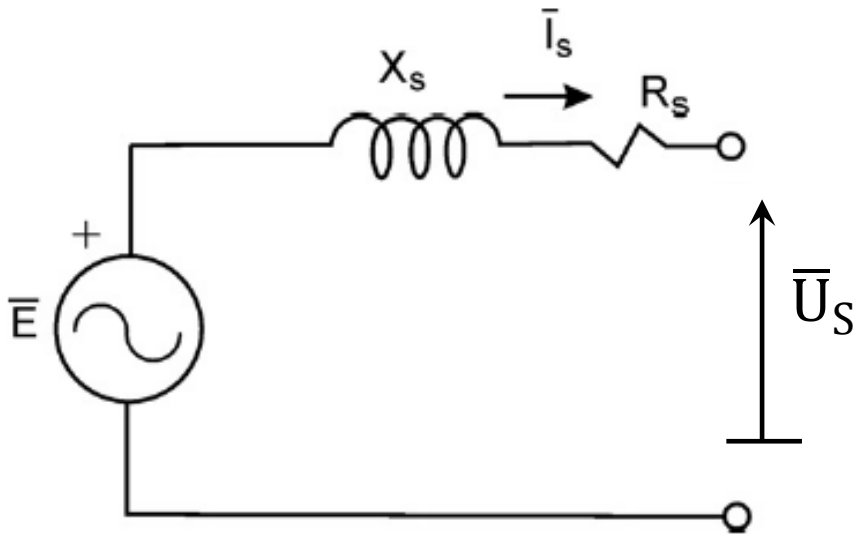
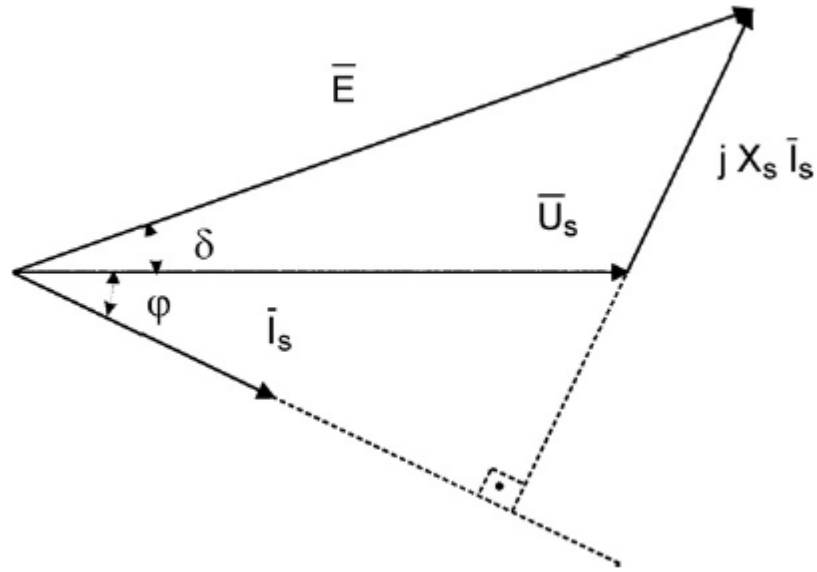
$$P_S + jQ_S = 3\bar{U}_S \bar{I}_S^*$$



$$\bar{I}_S = \frac{\bar{E} - \bar{U}_S}{jX_S}$$

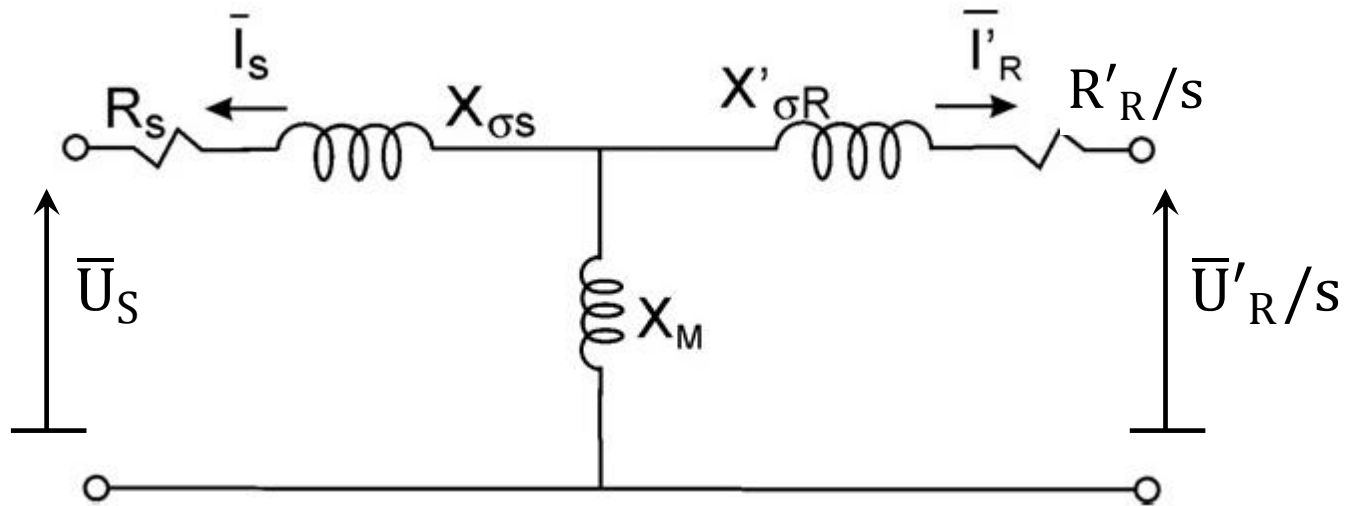
$$P_S = 3 \frac{EU_S}{X_S} \sin \delta$$

$$Q_S = 3 \frac{EU_S}{X_S} \cos \delta - 3 \frac{U_S^2}{X_S}$$



$$P_S = 3 \frac{E U_S}{X_S} \sin \delta$$

$$Q_S = 3 \frac{E U_S}{X_S} \cos \delta - 3 \frac{U_S^2}{X_S}$$



$$P_R + jQ_R = 3\bar{U}'_R \bar{I}'_R^*$$

$$P_R + jQ_R = 3 \left[-R'_R I'^2_R - jsX'_R I'^2_R + js \frac{1}{X_S} (\bar{E} - \bar{U}_S) \bar{E}^* \right]$$

$$P_R = -3s \frac{EU_S}{X_S} \sin \delta$$

$$Q_R = -3s \left[X'_R I'^2_R + \frac{EU_S}{X_S} \cos \delta - \frac{E^2}{X_S} \right]$$

$$P_R = -sP_S$$

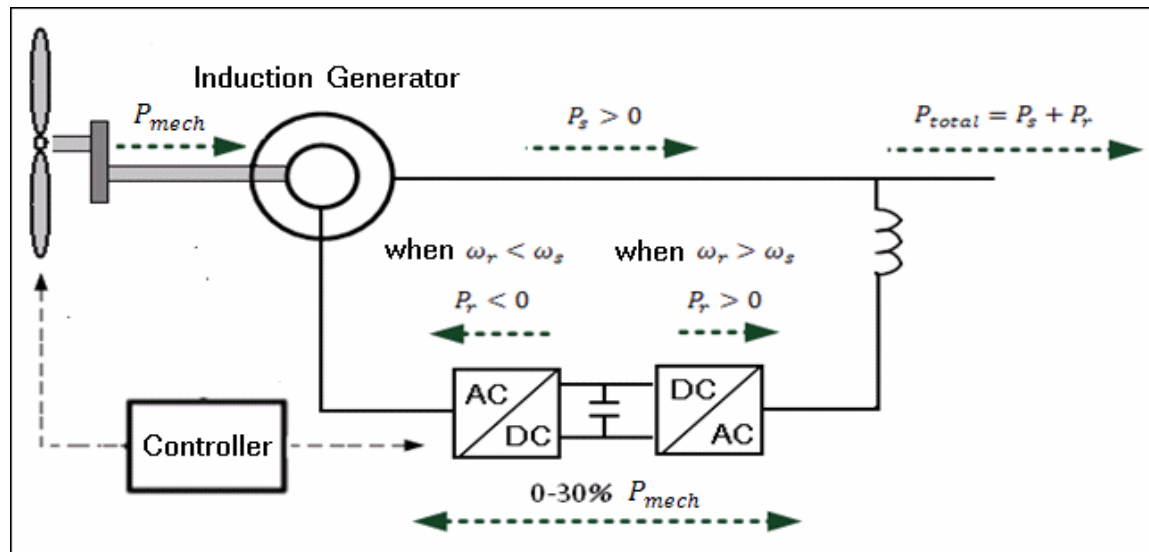
$$P_{Tot} = P_S + P_R$$

$$P_S = \frac{1}{1-s} P_{Tot}$$

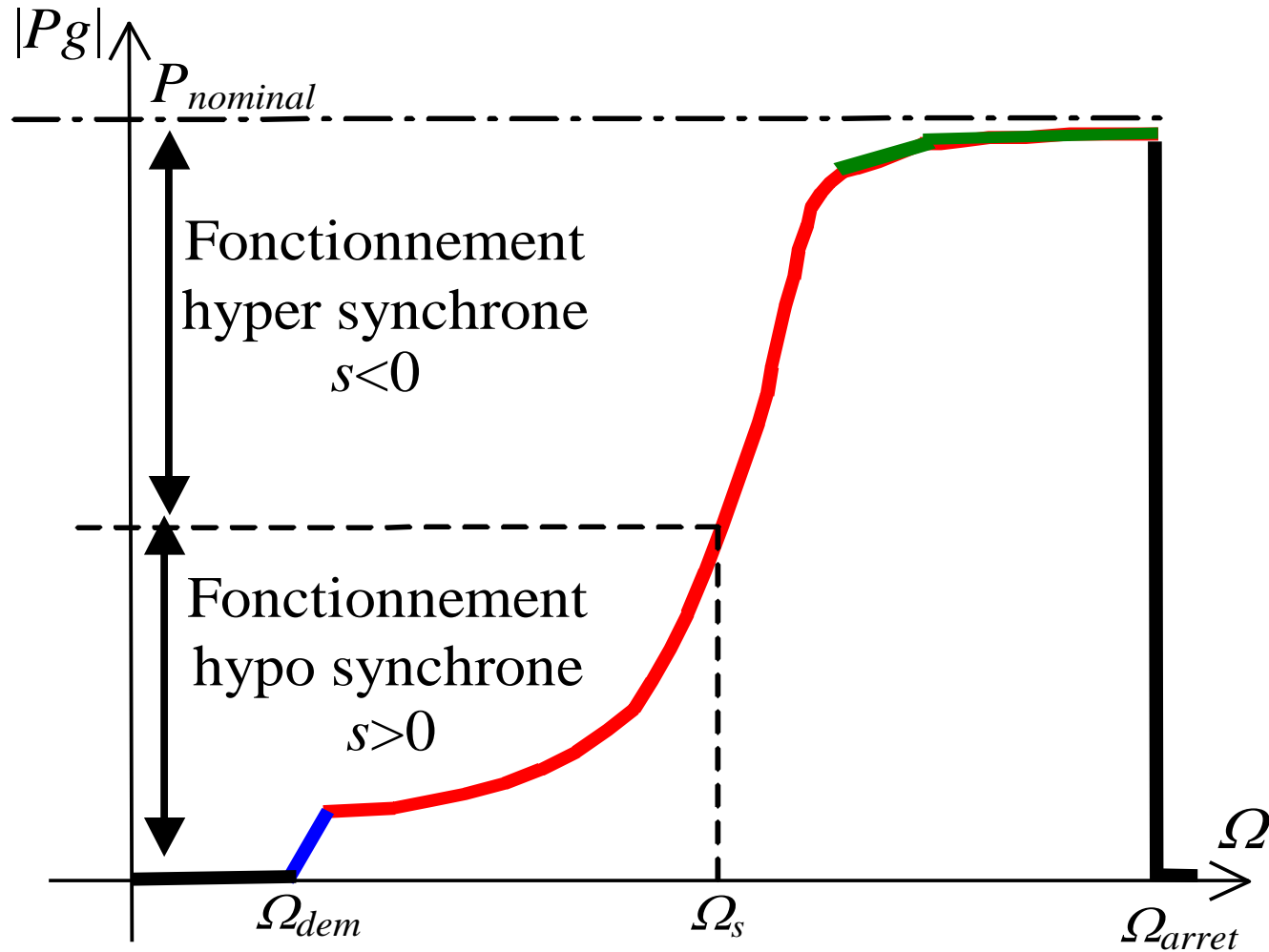
$$P_R = \frac{s}{s-1} P_{Tot}$$

$$1-s = \omega_{p.u.}$$

$$P_{Tot} = \omega_{p.u.} P_S$$



Machine asynchrone à double alimentation: Caractéristique de fonctionnement théorique

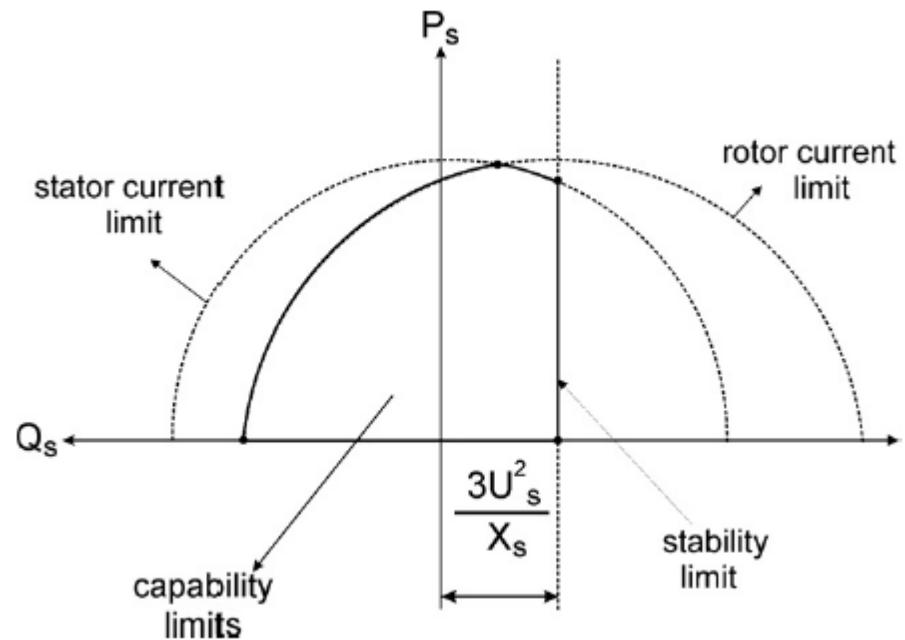


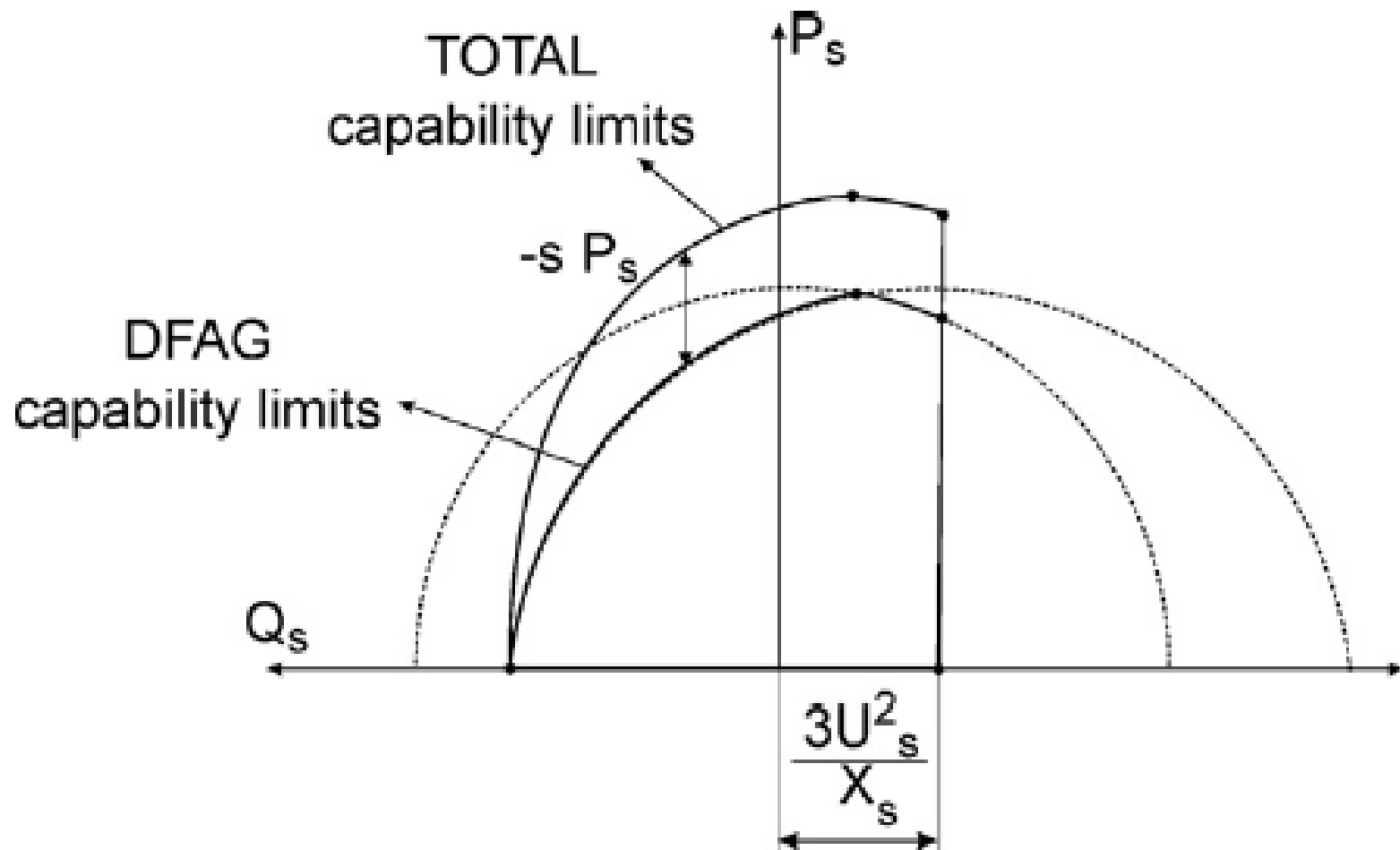
$$P_S = 3 \frac{X_M}{X_S} I_{Rmax} U_S \sin \delta$$

$$Q_S = 3 \frac{X_M}{X_S} I_{Rmax} U_S \cos \delta - 3 \frac{U_S^2}{X_S}$$

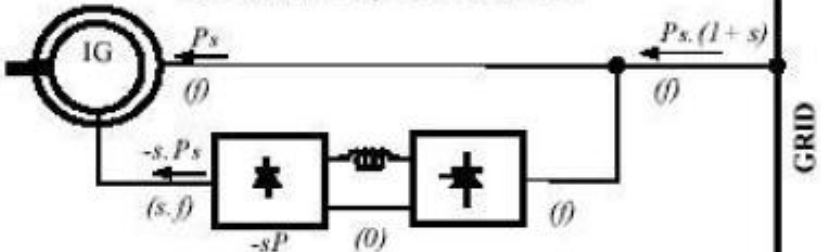
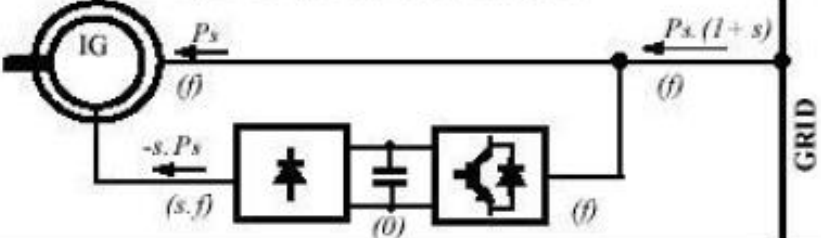
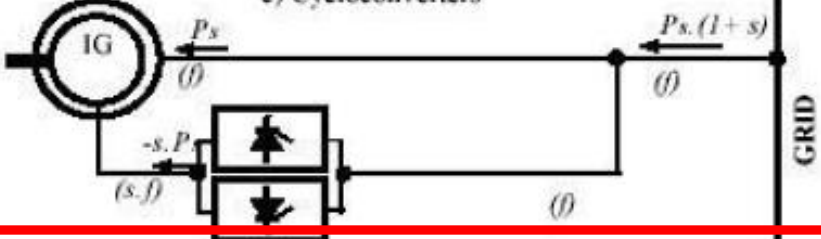
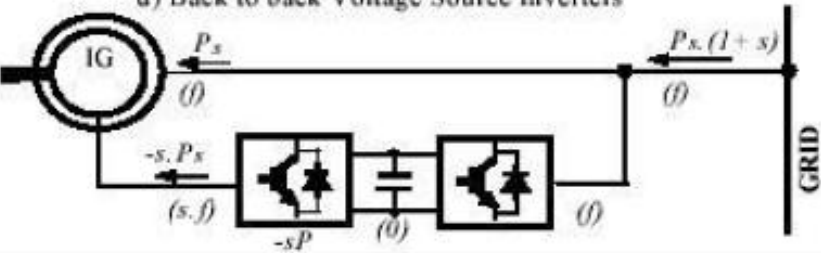
$$P_S^2 + \left(Q_S + 3 \frac{U_S^2}{X_S} \right)^2 = \left(3 \frac{X_M}{X_S} I_{Rmax} U_S \right)^2$$

$$P_S^2 + Q_S^2 = (3U_S I_S)^2$$



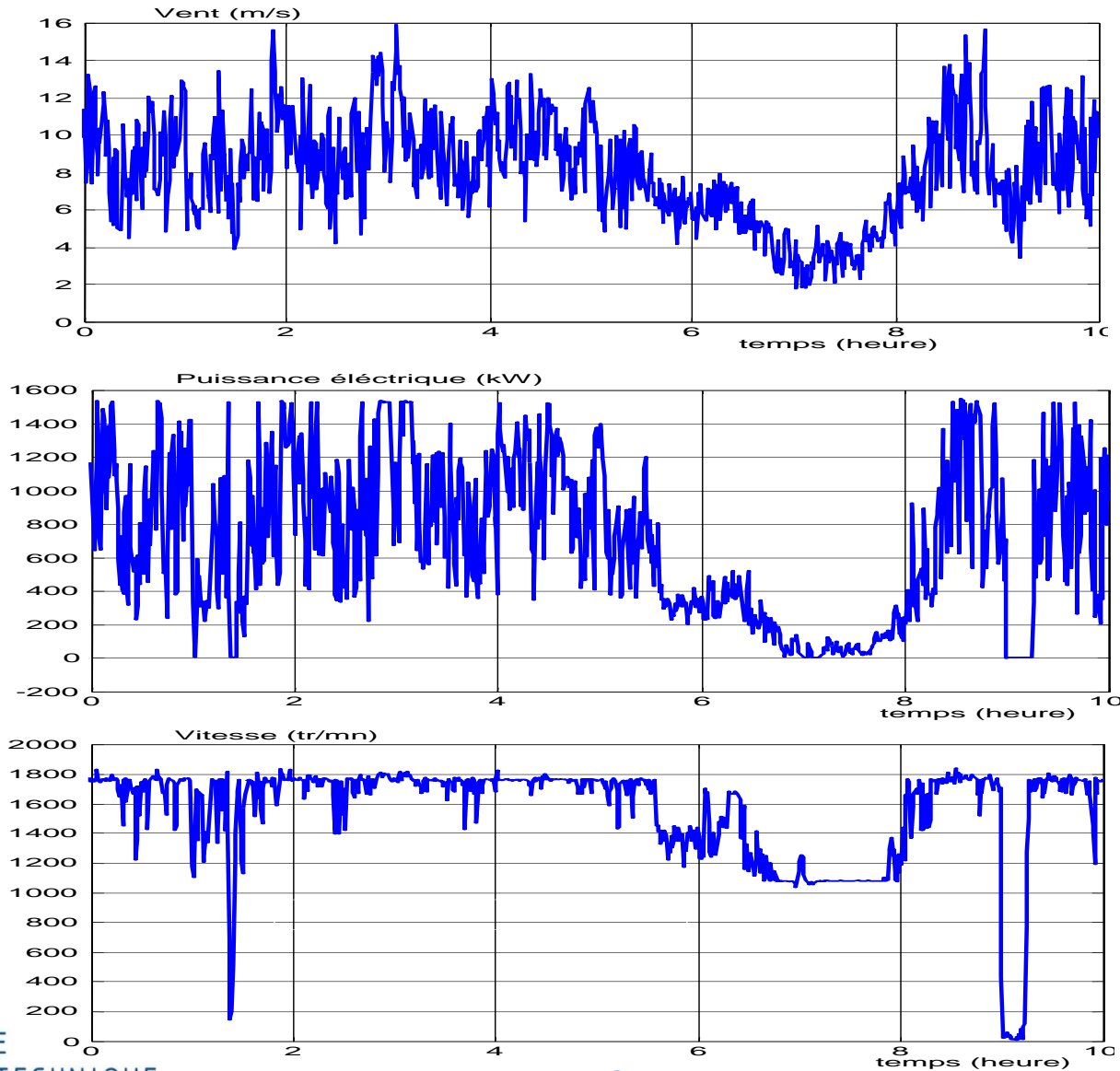


Machine asynchrone à double alimentation: variantes

Technology	Properties of used electronic power converters
<p>a) Diodes and thyristor converters</p> 	<p>Transfert unidirectionnel de la puissance du rotor vers le réseau quand on est au-dessus de la vitesse de synchronisme (glissement $s < 0$).</p> <p>Pas de contrôle de la vitesse sous la vitesse de synchronisme. (glissement $s > 0$)</p> <p>Pas de contrôle de la puissance réactive.</p>
<p>b) Diodes and transistor converters</p> 	<p>Transfert unidirectionnel de la puissance du rotor vers le réseau quand on est au-dessus de la vitesse de synchronisme (glissement $s < 0$).</p> <p>Pas de contrôle de la vitesse sous la vitesse de synchronisme. (glissement $s > 0$)</p> <p>Contrôle de la puissance réactive.</p>
<p>c) Cycloconverters</p> 	<p>Transfert bidirectionnel de la puissance du rotor vers le réseau.</p> <p>Contrôle complet de la vitesse.</p> <p>Pas de contrôle de la puissance réactive.</p>
<p>d) Back to back Voltage Source Inverters</p> 	<p>Transfert bidirectionnel de la puissance du rotor vers le réseau.</p> <p>Contrôle complet de la vitesse.</p> <p>Contrôle de la puissance réactive.</p>

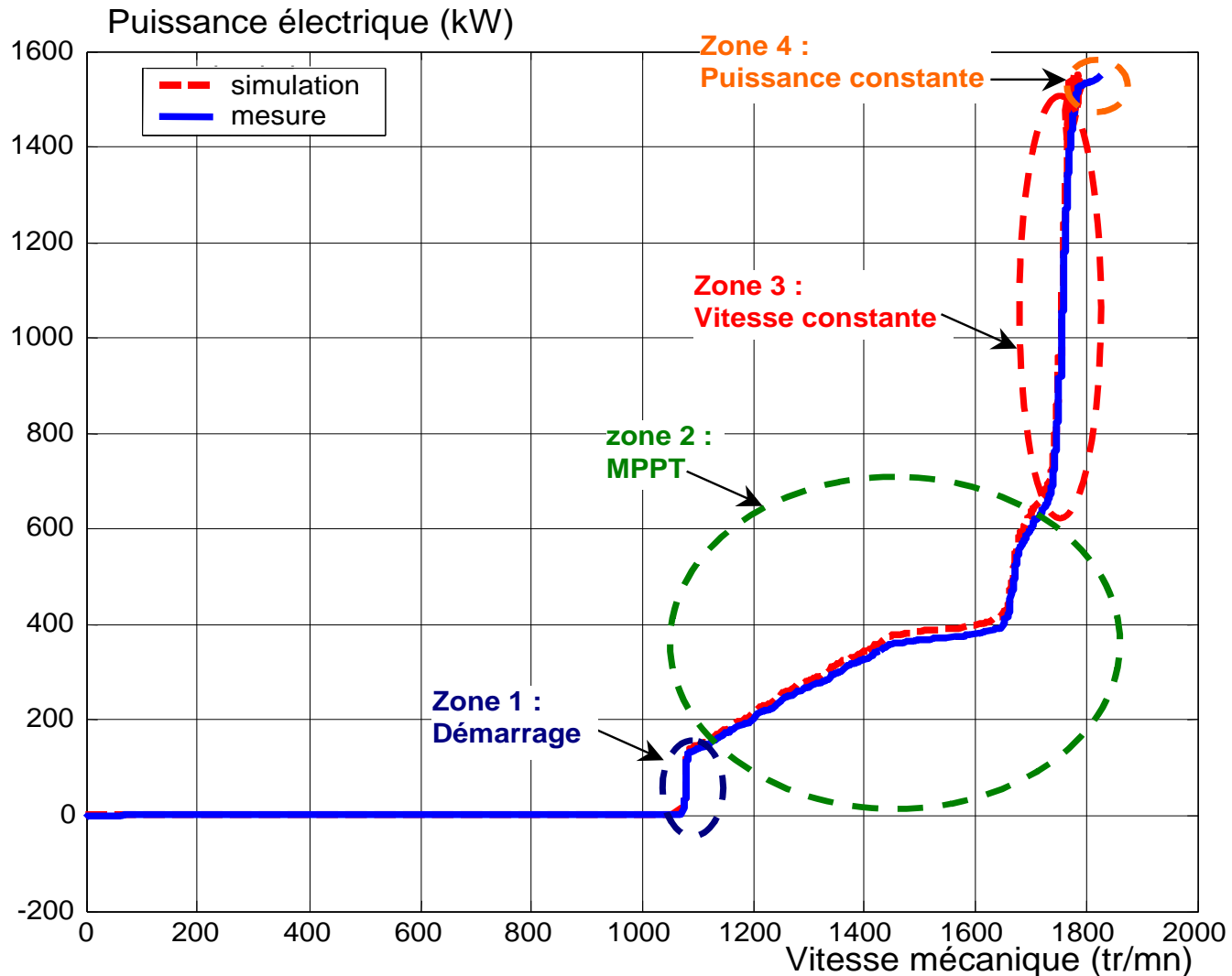
Machine asynchrone à double alimentation

Exemple de mesure des caractéristiques de fonctionnement



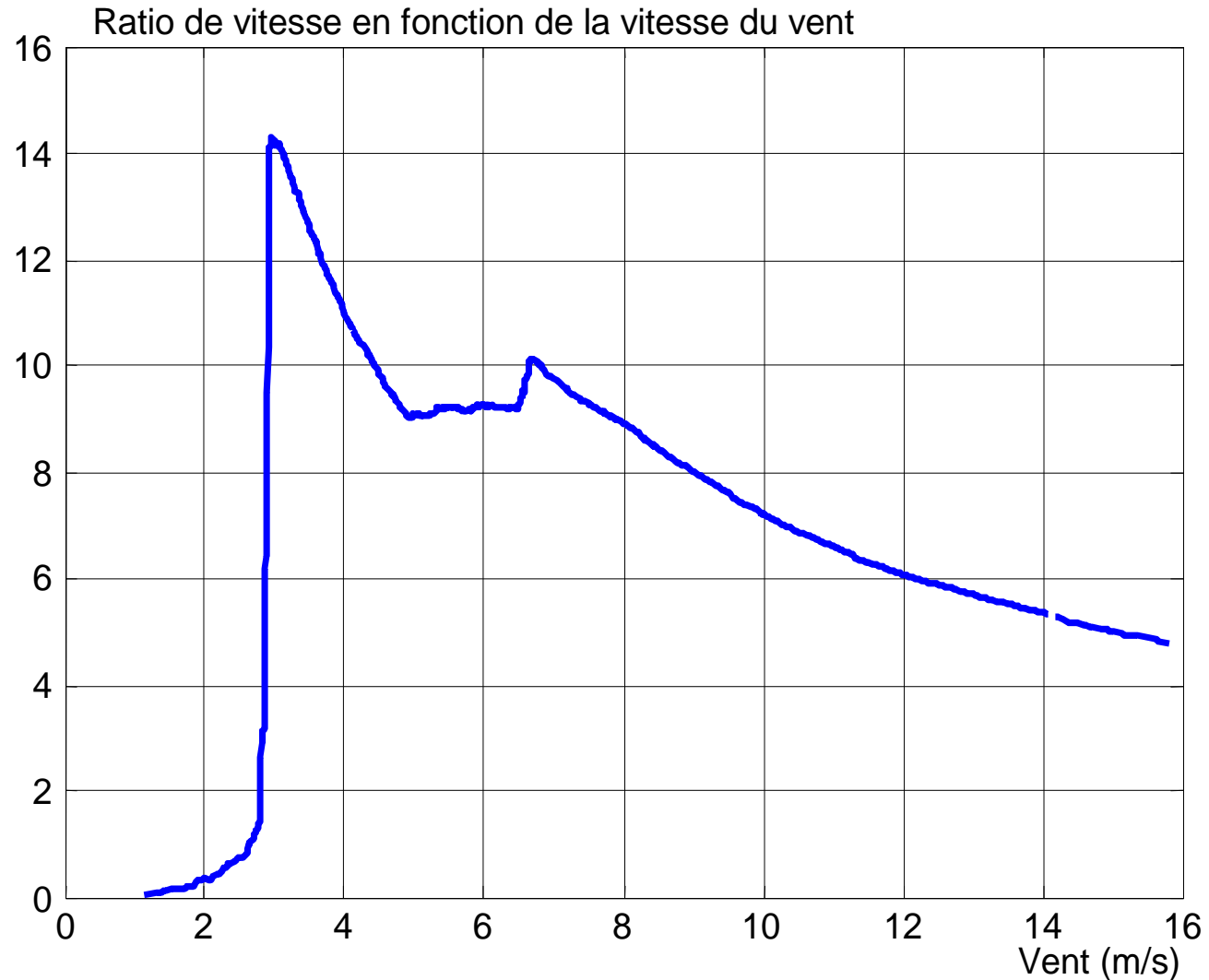
Machine asynchrone à double alimentation :

Exemple de caractéristiques de fonctionnement expérimentales



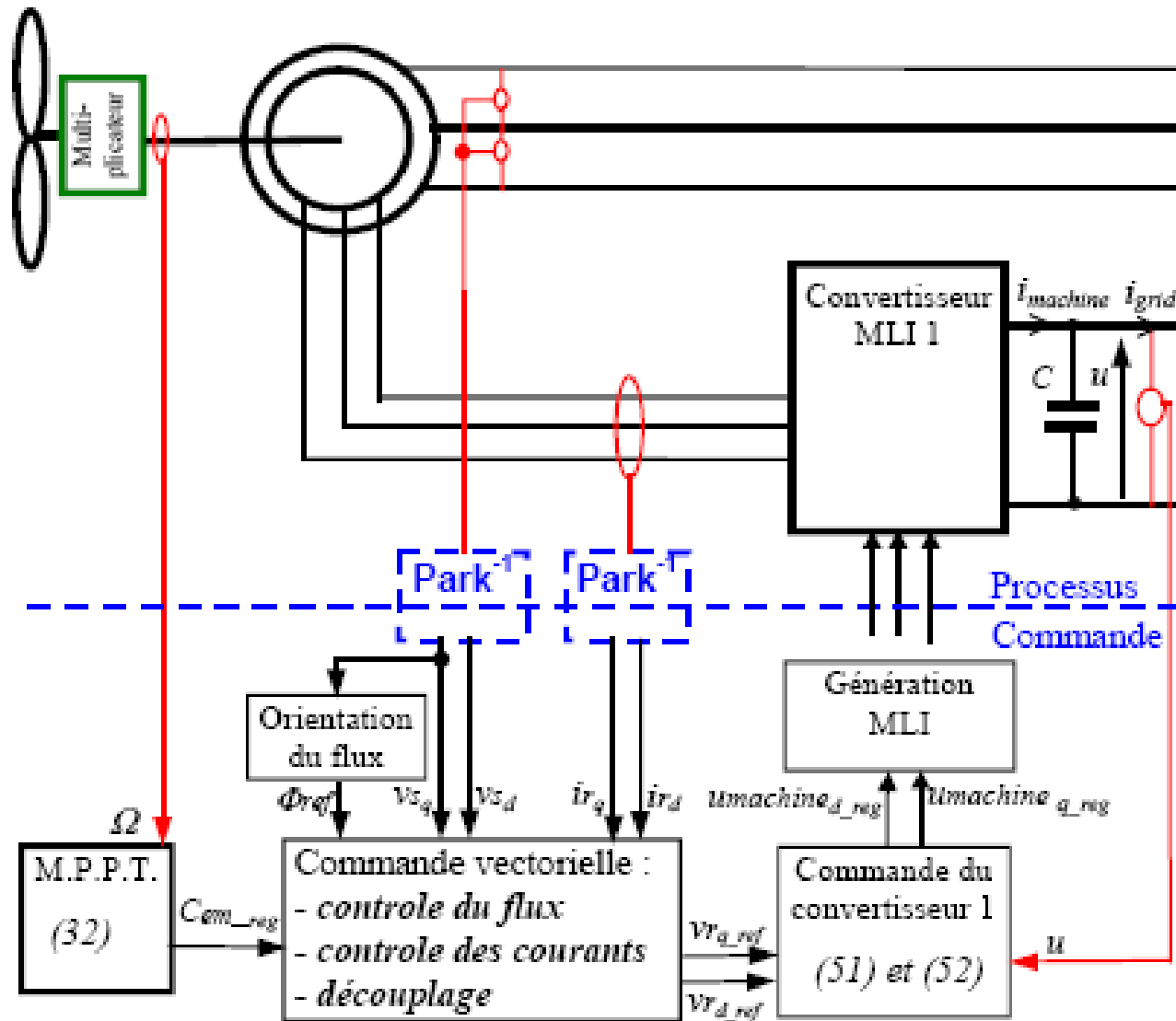
Machine asynchrone à double alimentation :

Exemple de caractéristiques de fonctionnement expérimentales

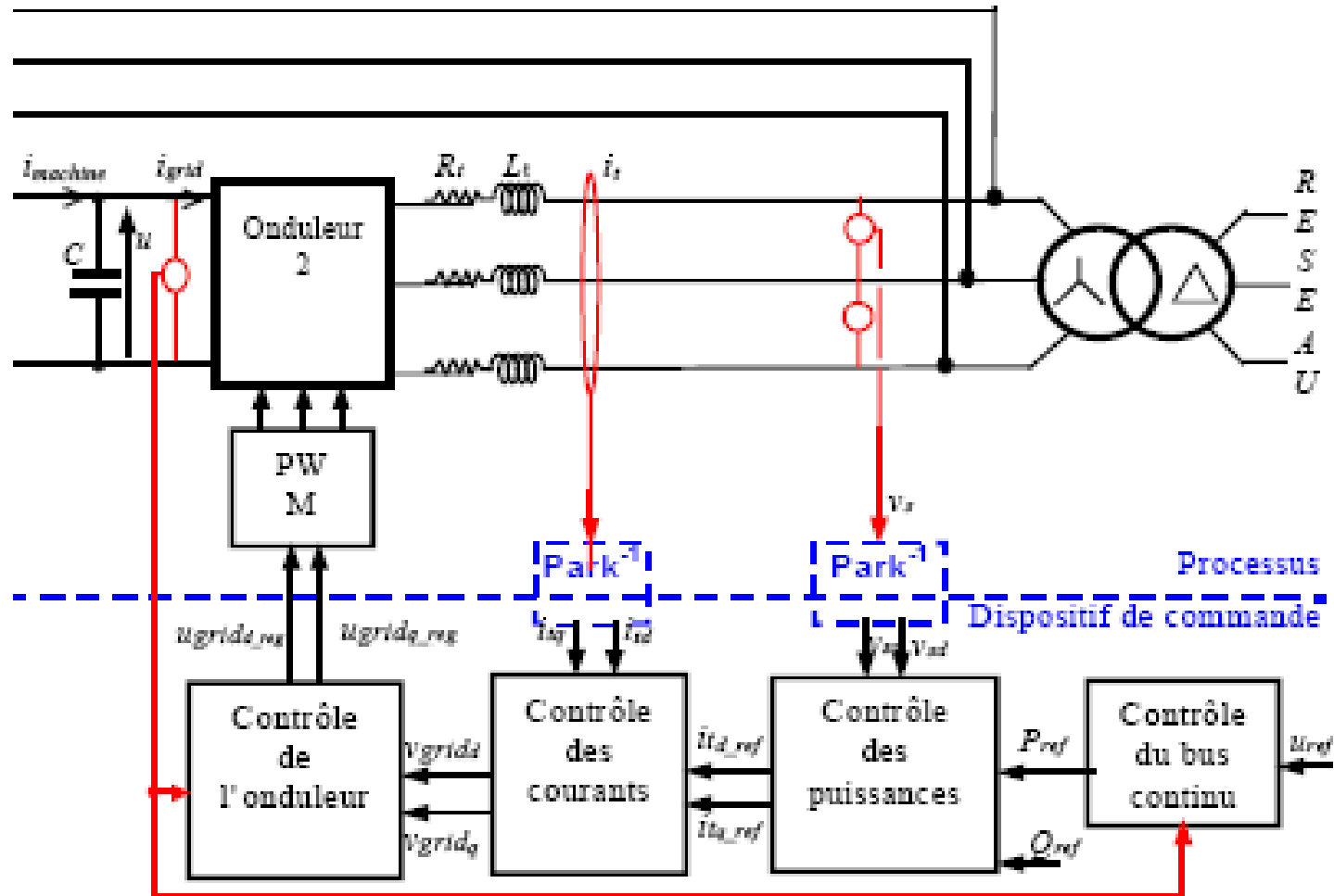


Machine asynchrone à double alimentation :

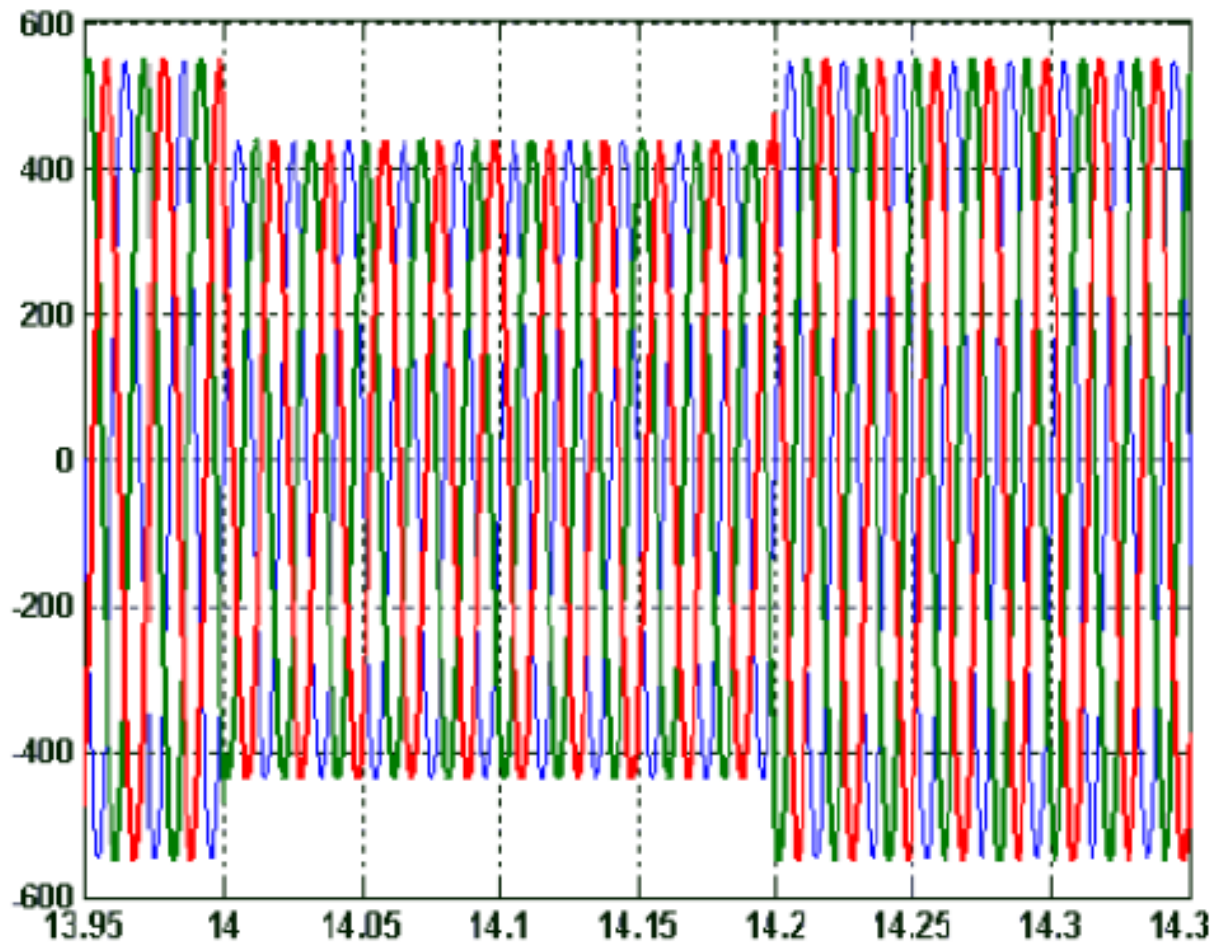
Principe de la commande des convertisseurs (1)



Machine asynchrone à double alimentation : Principe de la commande des convertisseurs (2)



Machine asynchrone à double alimentation : Comportement dynamique sur creux de tension

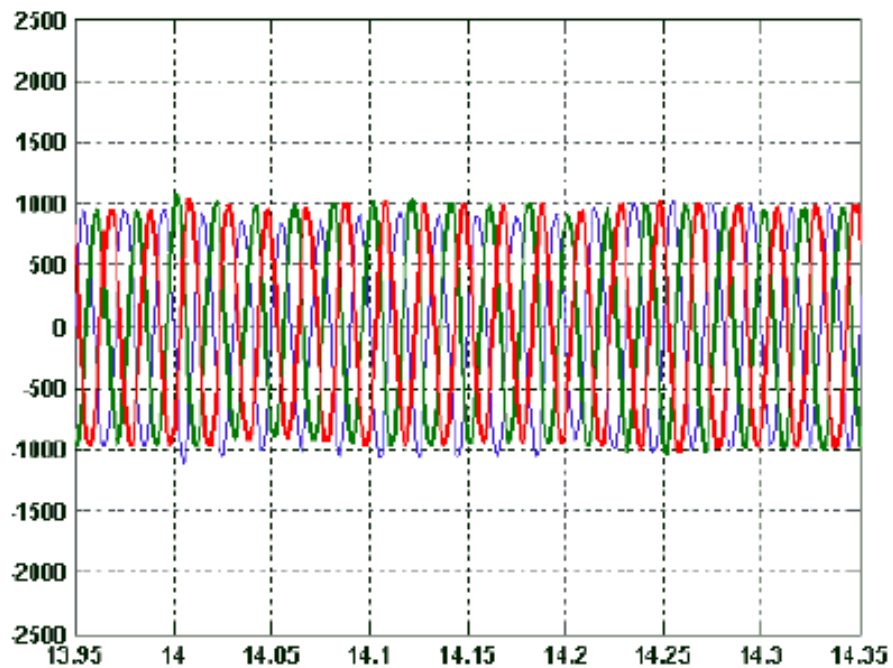


Creux de tension triphasé de 20 %, d'une durée de 200 ms

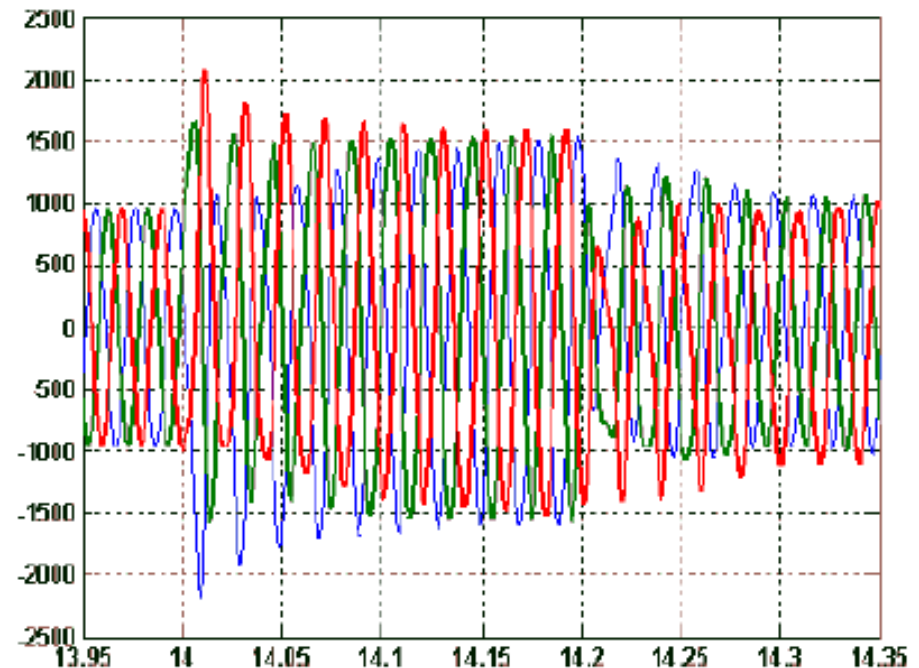
Machine asynchrone à double alimentation : Comportement dynamique sur creux de tension

Approche « synchrone » : la composante directe du courant rotor est réglée pour assurer le contrôle de la puissance réactive

Approche « asynchrone » : la composante directe du courant rotor est réglée pour assurer le contrôle du flux



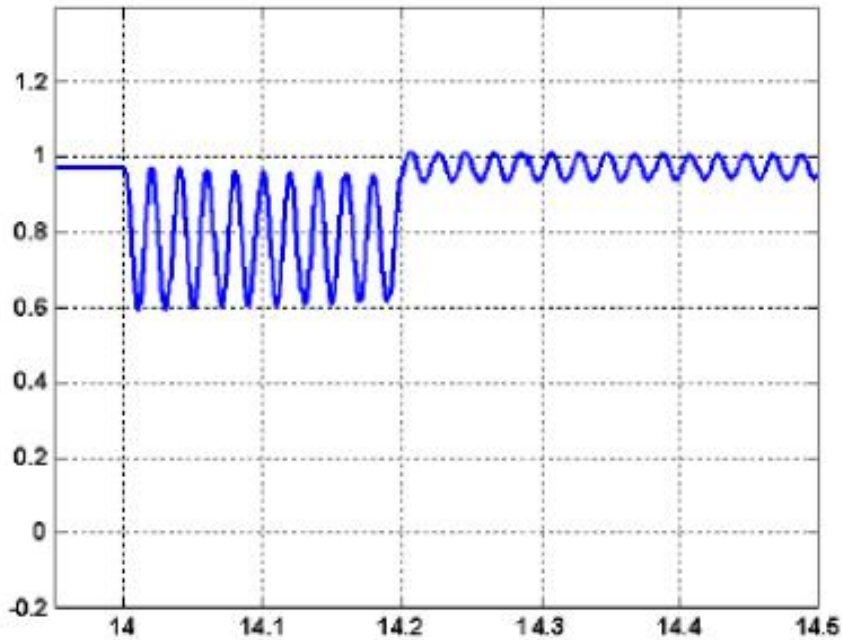
(a) Synchronous approach



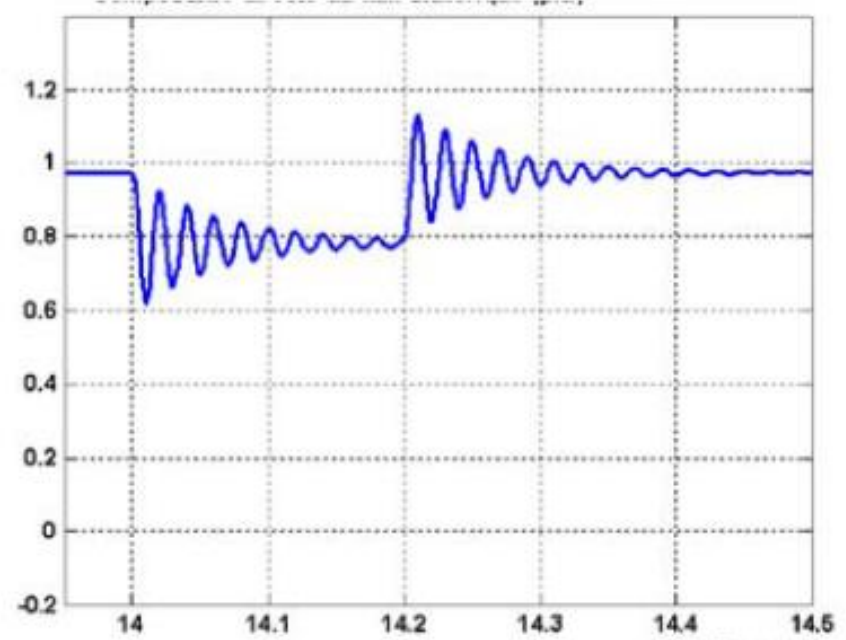
(b) Asynchronous approach

Evolution transitoire du courant total échangé avec le réseau

Machine asynchrone à double alimentation : Comportement dynamique sur creux de tension



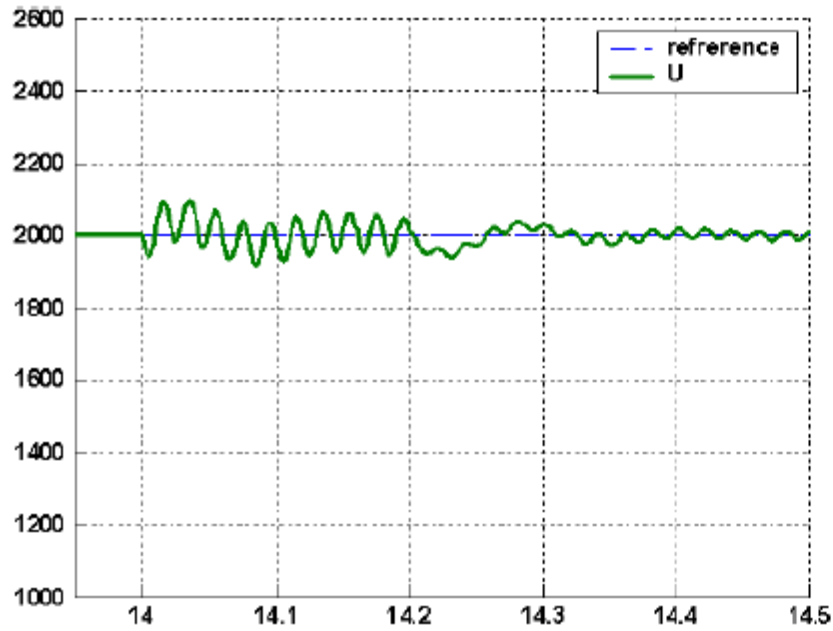
(a) Synchronous approach



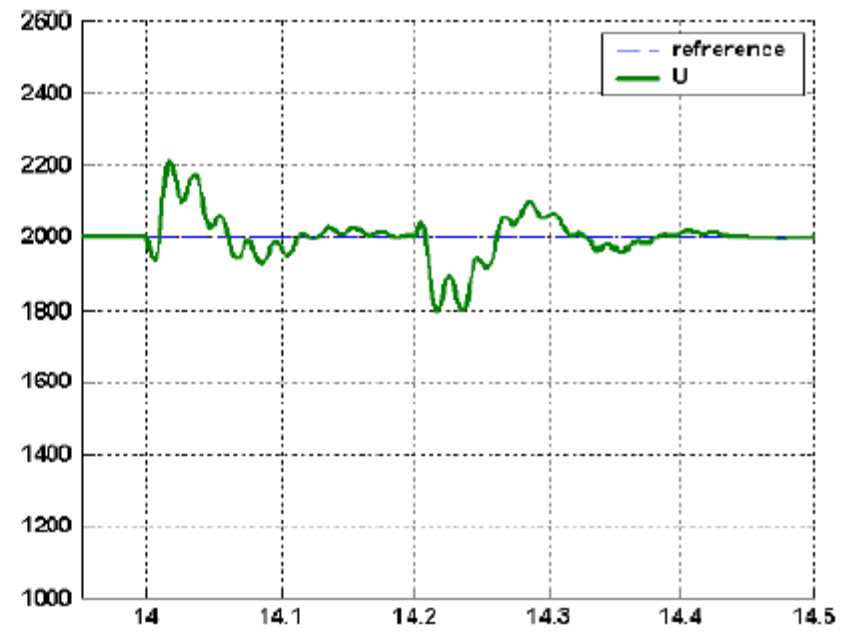
(b) Asynchronous approach

Evolution transitoire du flux

Machine asynchrone à double alimentation : Comportement dynamique sur creux de tension

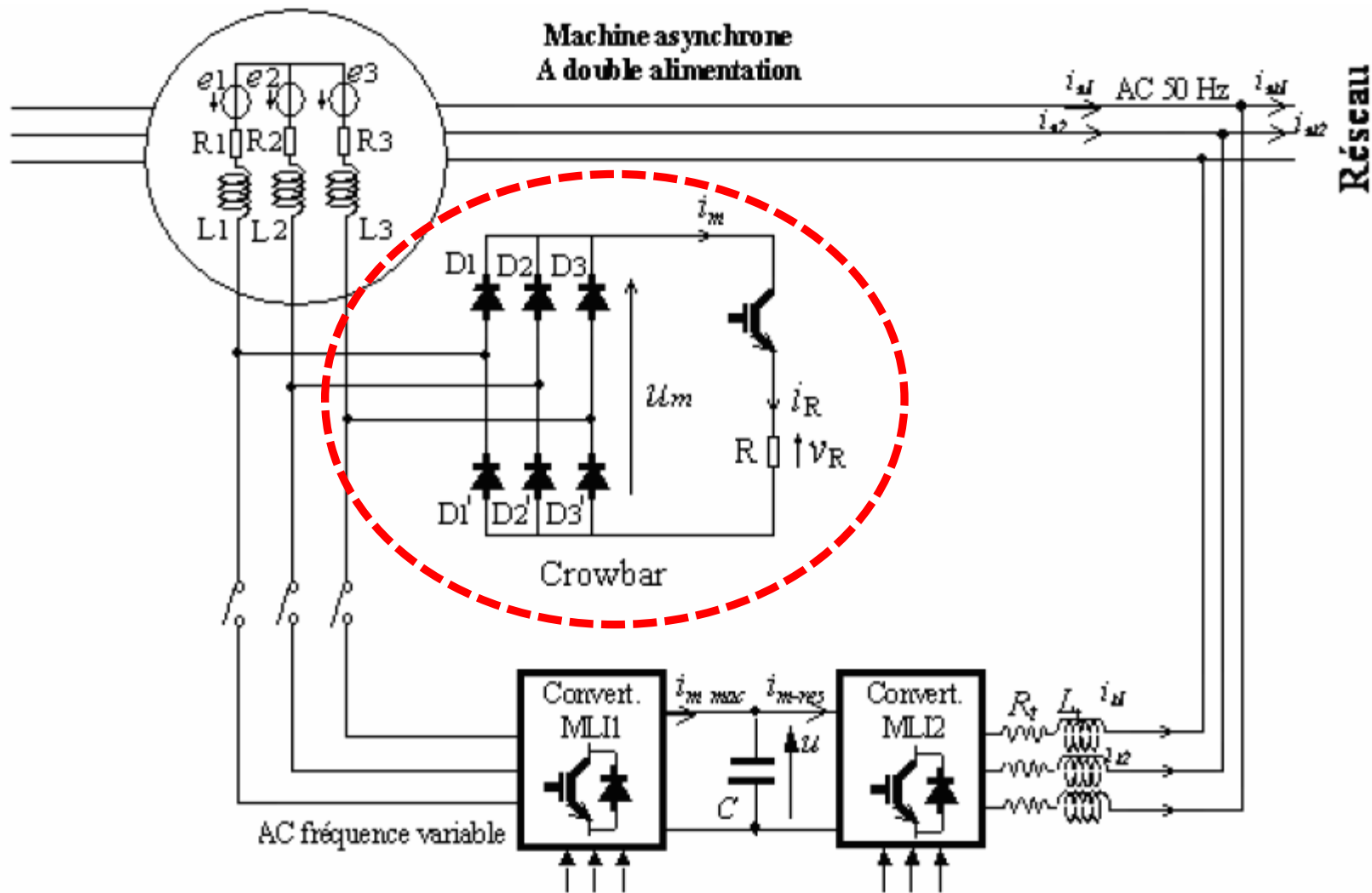


(a) Synchronous approach



(b) Asynchronous approach

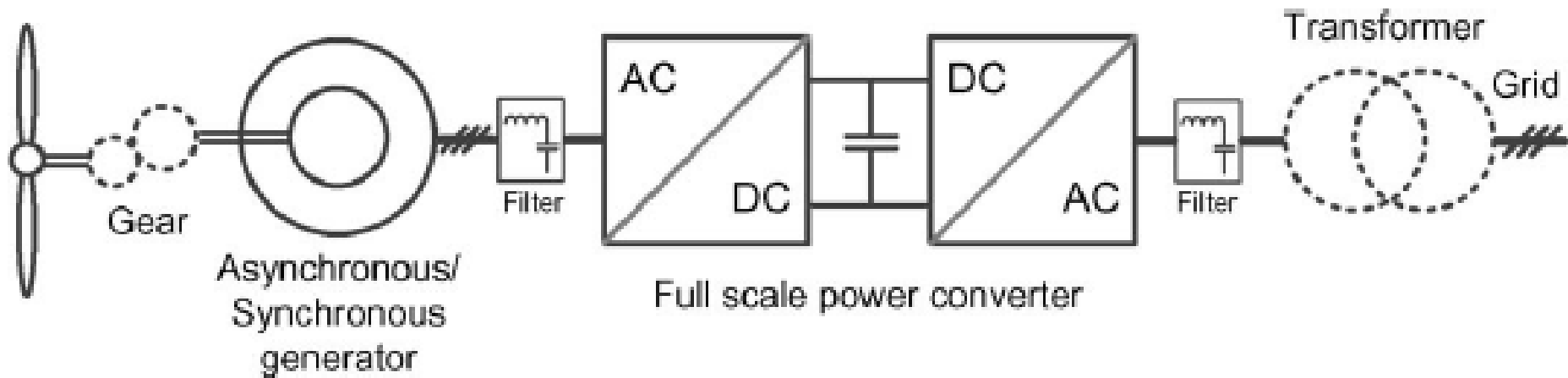
Evolution transitoire de la tension du bus DC



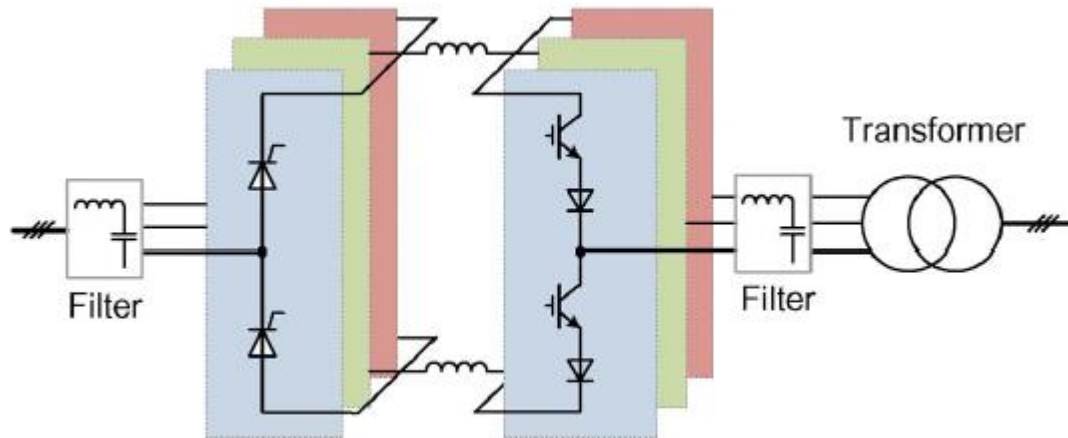
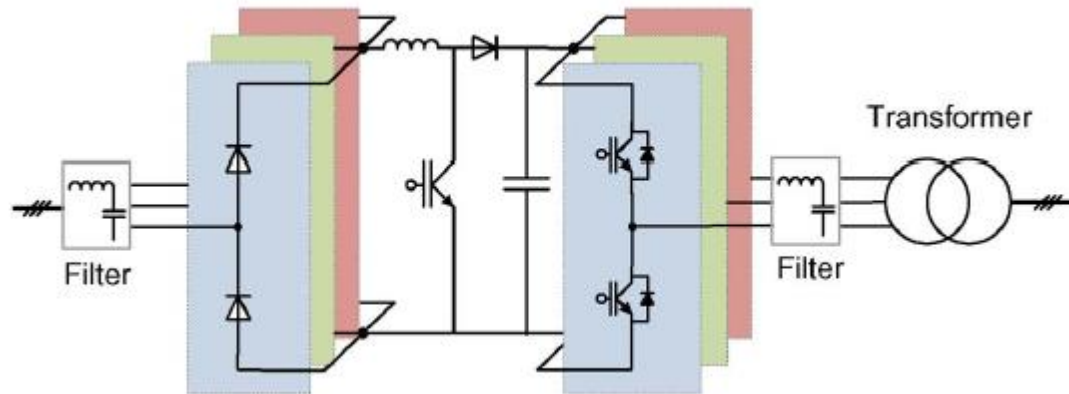


Machine asynchrone à double alimentation

Machine électrique connectée au travers d'une cascade complète de convertisseurs



Machine électrique connectée au travers d'une cascade complète de convertisseurs

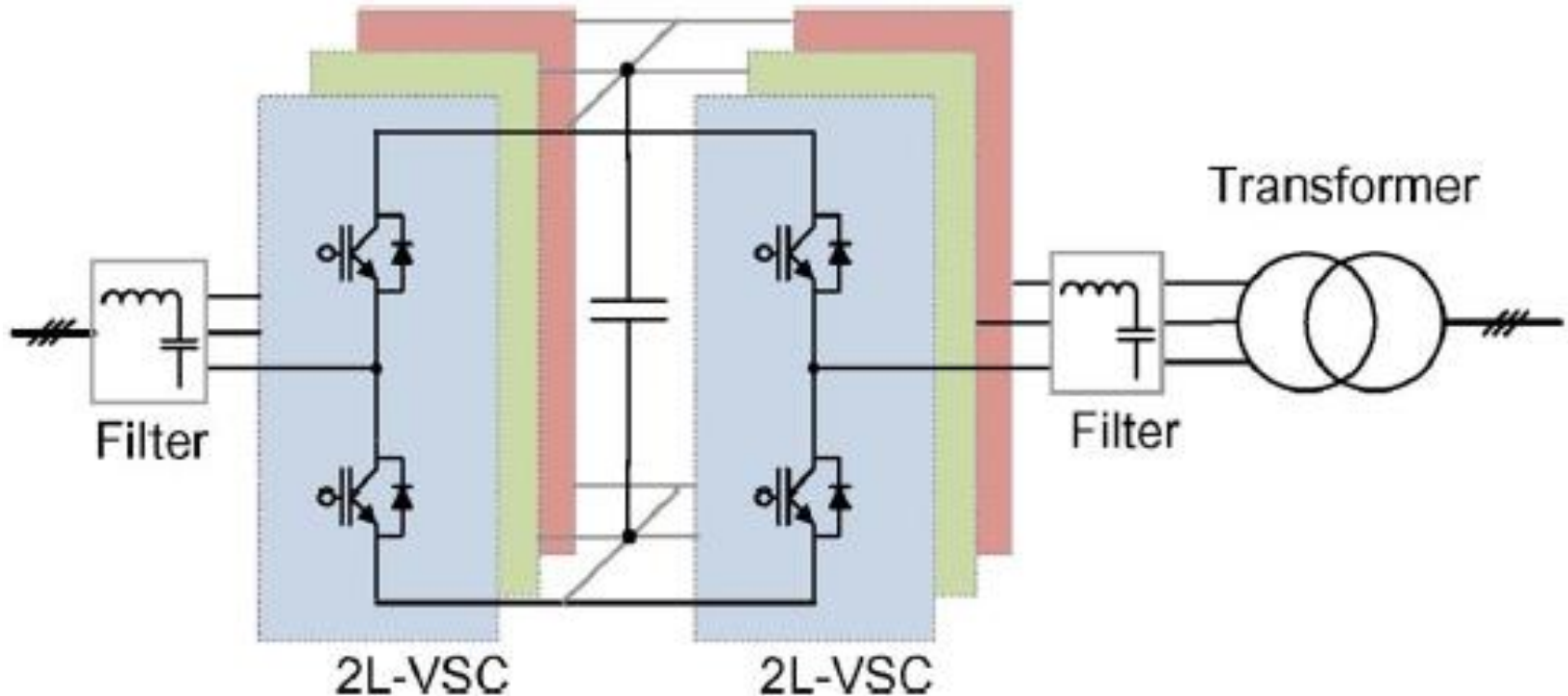


Convertisseurs «simples» côté machine (de type synchrone)

Micro-éoliennes ($P = 5 \text{ kW}$)



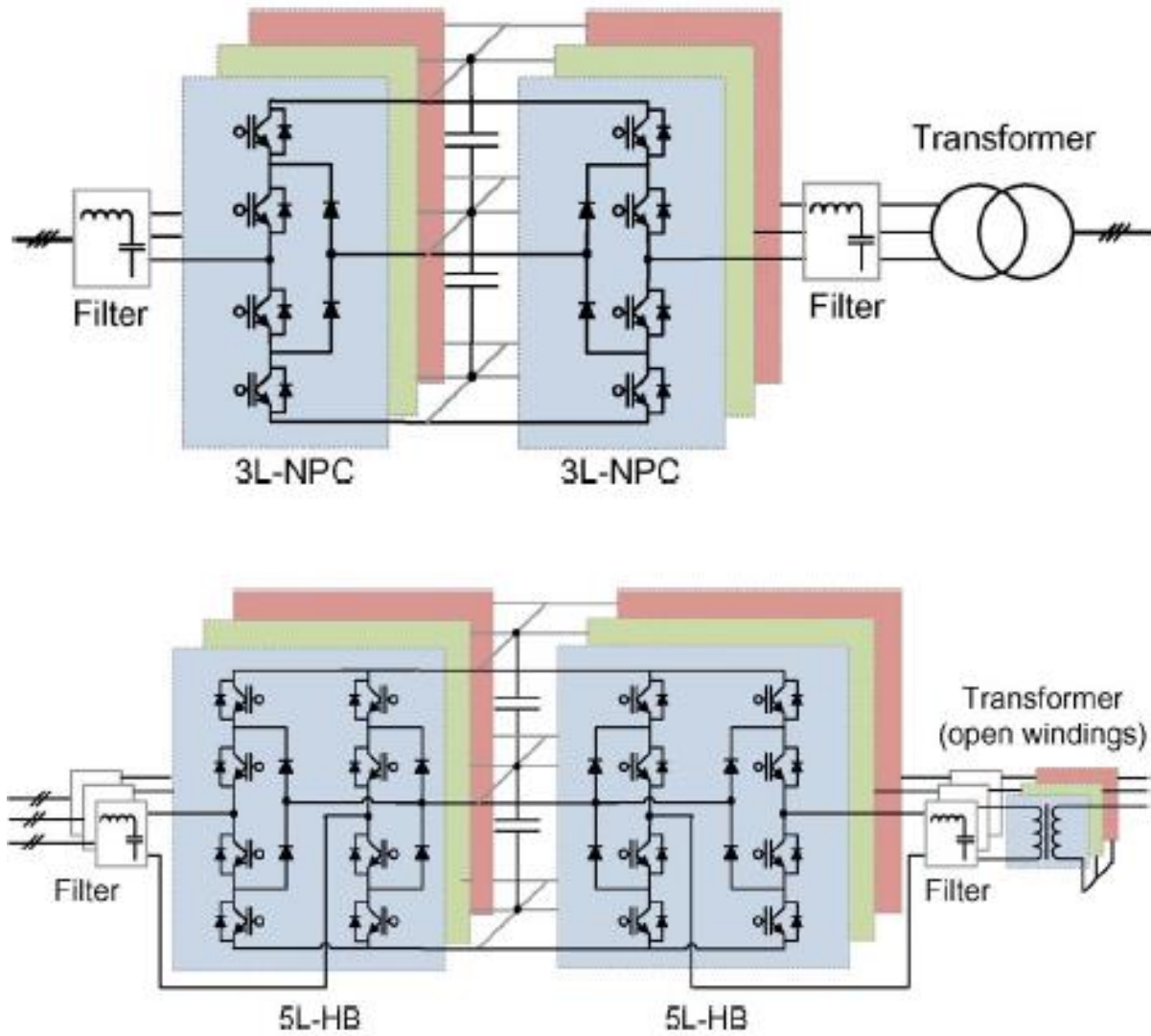
Machine électrique connectée au travers d'une cascade complète de convertisseurs



Le schéma le plus courant à l'heure actuelle (machines synchrones et/ou asynchrones)

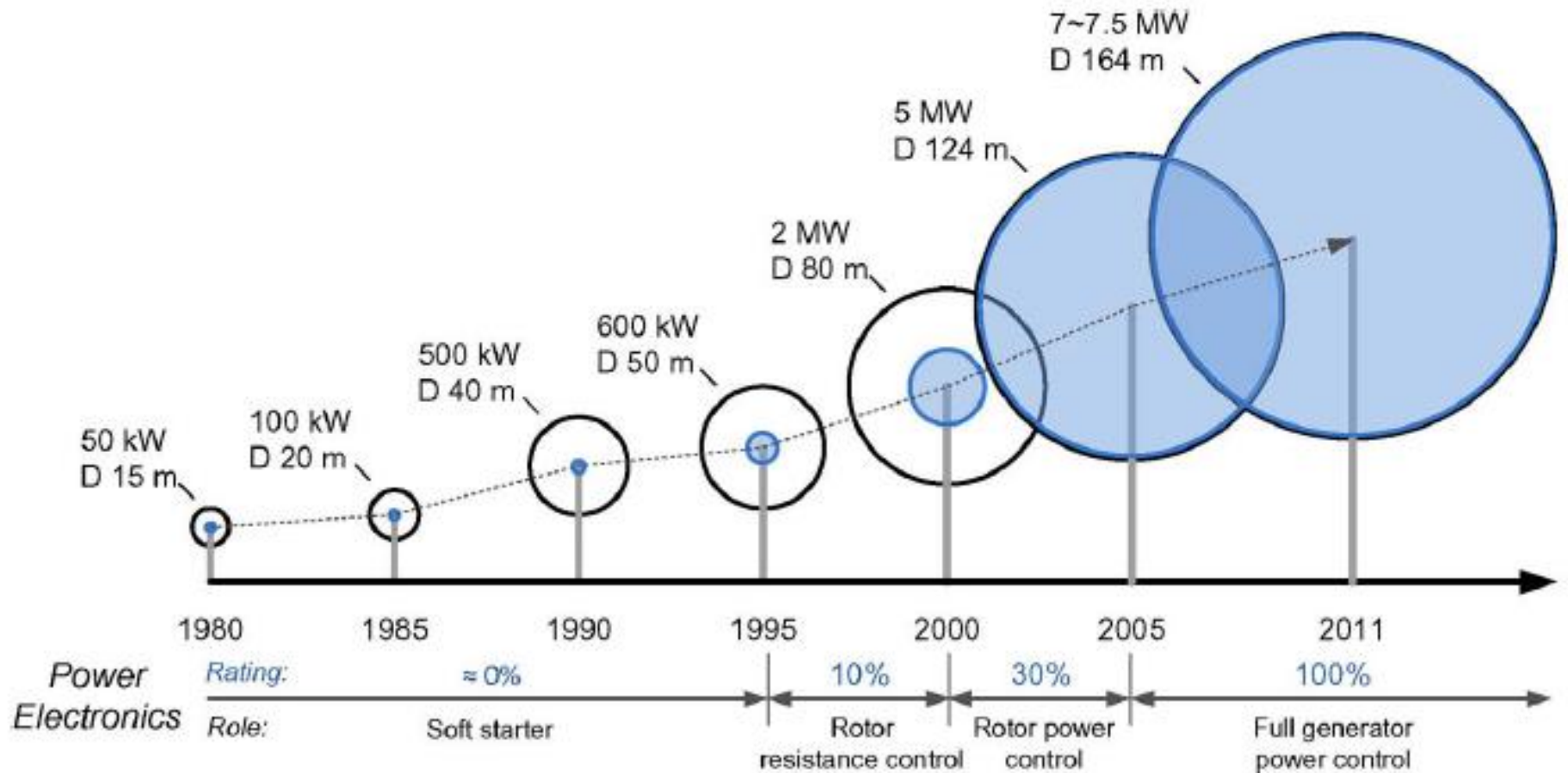


Machine connectée au travers d'une cascade complète de convertisseurs

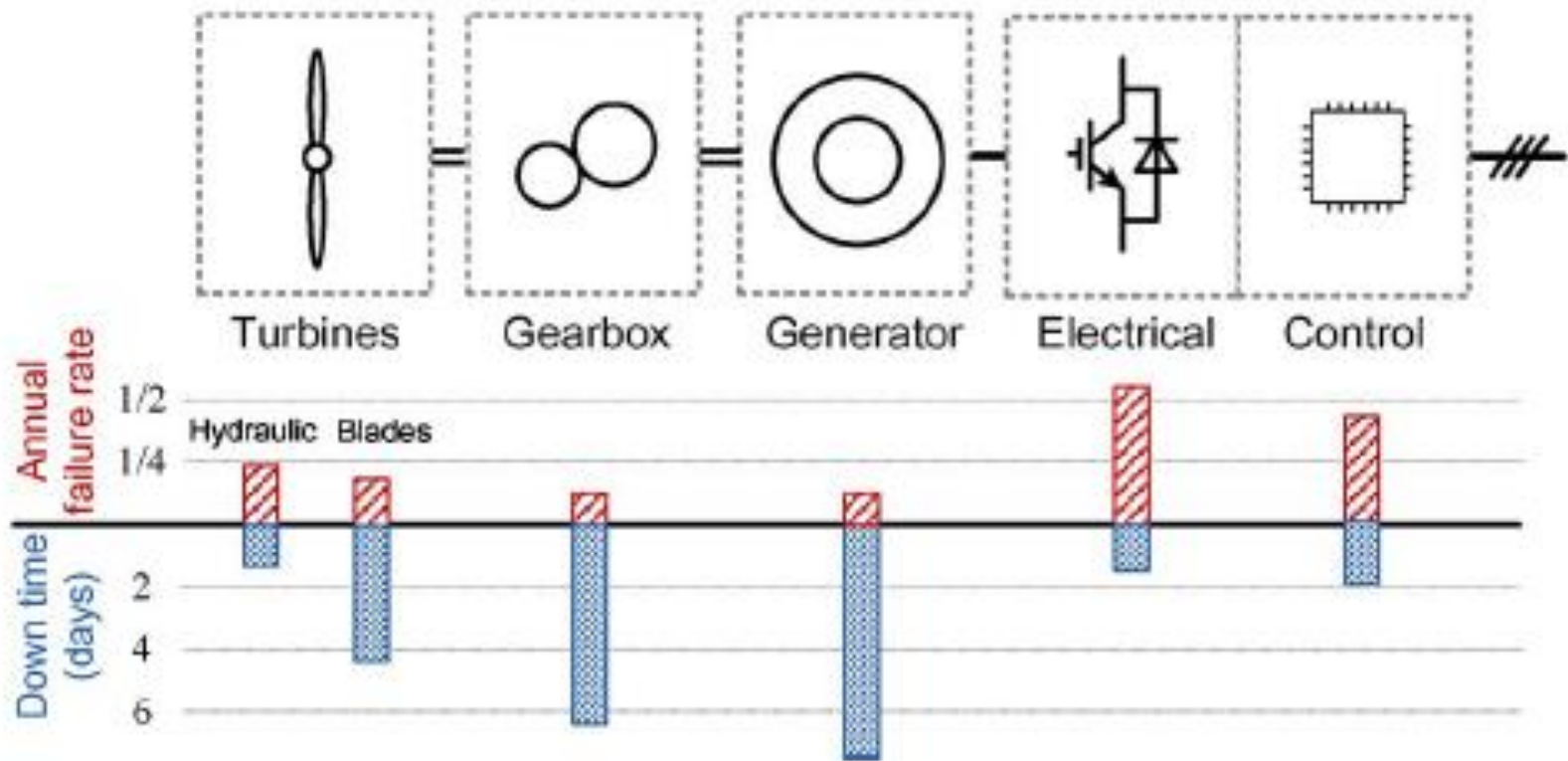


Evolution future: convertisseurs multiniveaux

Evolution des puissances unitaires et des technologies



Fiabilité ?



Développement de l'éolien offshore

