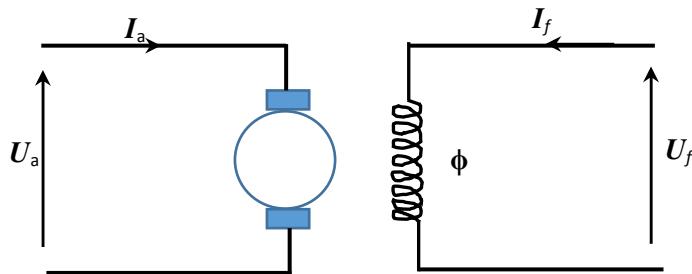


## II-1. Introduction :

Les machines à courant continu grâce au découplage naturel entre le couple et le flux ont constitué l'élément de base des entrainements à vitesse variable. Ce découplage permet d'avoir un contrôle séparé du couple et de flux (Fig. II-1)



*Fig. II- 1 Machine à courant continu à excitation séparée.*

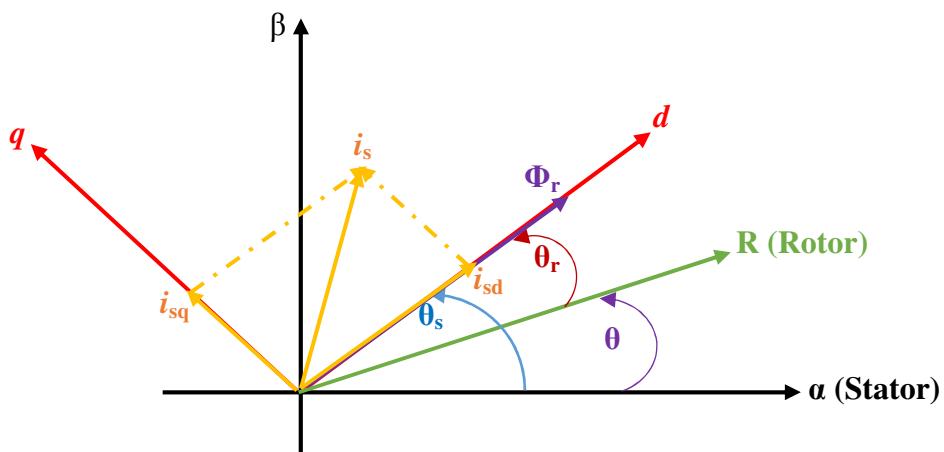
Le flux est fixé par le courant d'excitation  $I_f$  et le couple ( $C_e = k\phi I_a$ ) se contrôle d'une façon complètement découpée en agissant sur le courant d'induit  $I_a$  par l'intermédiaire de la tension d'alimentation  $U_a$ .

## II-2. Principe de la commande vectorielle à flux rotorique orienté :

La commande par orientation de flux consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante. Pour cela, il faut choisir un système d'axes  $d,q$  et une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux. Le couple d'une MAS est donné par :

$$C_e = p(\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \cancel{\Phi_{qr} i_{ds}}) \quad (\text{II-1})$$

La commande vectorielle à flux rotorique orienté, consiste à réécrire le modèle de la MSA dans un référentiel lié au flux rotorique, afin d'assurer une commande en couple par la composante du courant  $I_{qs}$  (Fig. II-2).



*Fig. II- 2 Orientation du flux statorique sur l'axe d*

Posons :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \Phi_r \\ \Phi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (\text{II-2})$$

alors le couple devient :

$$C_e = p \frac{M}{L_r} \Phi_r i_{qs} \quad (\text{II-3})$$

Et l'évolution du flux est donné par :

$$T_r \frac{d\Phi_r}{dt} + \Phi_r = M i_{ds} \quad (\text{II-4})$$

Avec :

$T_r$  est la constance de temps rotorique.

Le courant  $i_{ds}$  fixe le flux et le courant  $i_{qs}$  fixe le couple. On retrouve le comportement d'une machine à courant continu à excitation séparée.

### II-3. Modèle de la MAS en vue de sa commande :

La machine asynchrone peut avoir différents modèles d'états. La différence entre ces modèles réside dans le choix du vecteur d'état  $X$  et dans l'orientation du référentiel  $(d,q)$ [3], [4] .

La forme d'équation d'état de la MAS s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (\text{II-5})$$

En considérant le cas d'une MAS alimentée en tension, et en utilisant le référentiel  $(d,q)$  lié au champ tournant, les combinaisons possibles pour le vecteur d'état sont :

$$X_1 = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad X_2 = \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} \quad X_3 = \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad X_4 = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-6})$$

Le vecteur d'entrée :

$$U = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{II-7})$$

Le vecteur de sortie :

$$y = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{II-8})$$

Prenons comme variable d'état le vecteur  $X^T = [i_{sd} \quad i_{sq} \quad \Phi_{rd} \quad \Phi_{rq}]$

Le modèle d'état de la MAS est défini par le triplet  $[A], [B], [C]$ , tels que :

$$A = \begin{bmatrix} -\left[\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right] & \omega_s & \frac{1-\sigma}{\sigma M T_r} & \frac{1-\sigma}{\sigma M} \omega \\ -\omega_s & -\left[\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right] & -\frac{1-\sigma}{\sigma T_r} \omega & \frac{1-\sigma}{\sigma M T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & \omega_r \\ 0 & \frac{M}{T_r} & -\omega_r & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (\text{II-9})$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

Avec :  $\sigma$  est le coefficient de dispersion de BLONDEL.

$T_r$  et  $T_s$  sont respectivement les constantes de temps rotorique et statorique.

### II-3-1. Expressions du couple :

Le choix d'une telle expression du couple dépendra fortement du vecteur d'état choisi.

$$C_e = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{rd} i_{sq} - \Phi_{rq} i_{sd}) \quad (\text{II-11})$$

$$C_e = p (\Phi_{rq} i_{rd} - \Phi_{rd} i_{rq}) \quad (\text{II-12})$$

$$C_e = p M (i_{rd} i_{sq} - i_{rq} i_{sd}) \quad (\text{II-13})$$

$$C_e = p \frac{M}{L_s} (\Phi_{sq} i_{rd} - \Phi_{sd} i_{rq}) \quad (\text{II-14})$$

$$C_e = p \frac{1-\sigma}{M \sigma} (\Phi_{rd} \Phi_{sq} - \Phi_{rq} \Phi_{sd}) \quad (\text{II-15})$$

## II-4. Elaboration des lois de commande :

A partir du modèle d'état établi de la MAS dans un référentiel lié au champ tournant, en

$$\text{exploitant le résultat de l'orientation du champ} \quad \begin{cases} \Phi_{dr} = \Phi_r \\ \Phi_{qr} = 0 \end{cases}$$

Nous avons :

$$\begin{cases} V_{sd} = \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + \left( R_s + \frac{M^2}{L_r^2} R_r \right) i_{sd} - \sigma L_s \omega_s i_{sq} - \frac{M}{L_r^2} R_r \Phi_r \\ V_{sq} = \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \left( R_s + \frac{M^2}{L_r^2} R_r \right) i_{sq} + \sigma L_s \omega_s i_{sd} + \frac{M}{L_r} \omega \Phi_r \end{cases} \quad (\text{II-16})$$

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_r}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \Phi_r \\ \omega_r = \frac{M}{T_r \Phi_r} i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II-17})$$

Le couple est donné par :

$$C_e = p \frac{M}{L_r} \Phi_r i_{sq} \quad (\text{II-18})$$

Pour un flux constant, le couple dépend de la composante  $i_{sq}$ .

Les expressions (II-16) et (II-17) représentent les lois de la commande vectorielle à flux rotorique orienté, les tensions  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  représentent les grandeurs de commande qui affectent à la fois les courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ , donc le flux et le couple (Fig. II-3). Il est donc nécessaire de réaliser un découplage.

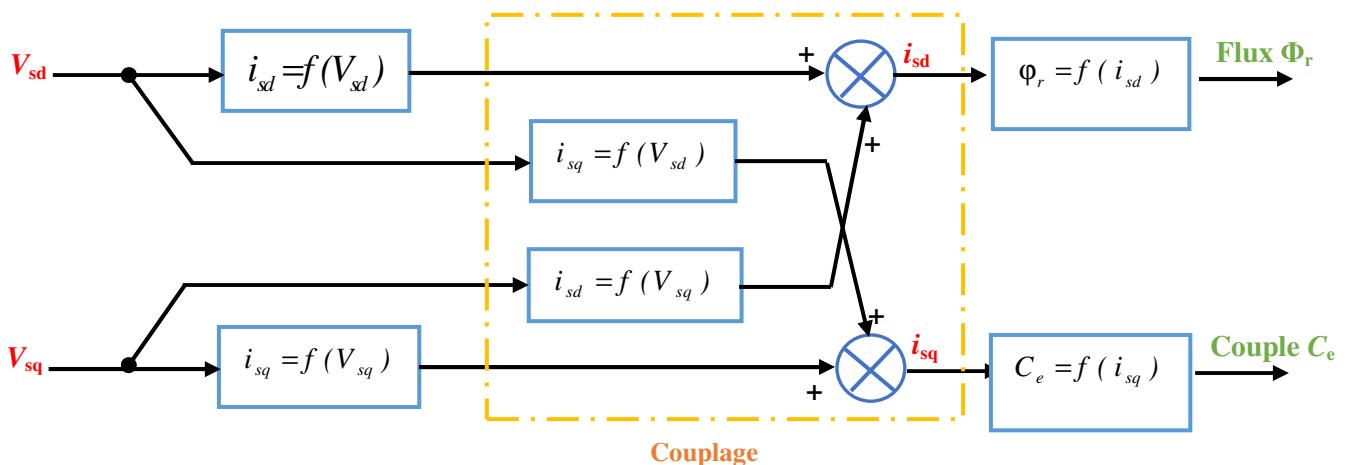


Fig. III- 3. Couplage des grandeurs.

### II-4-1. Découplage entrée-sortie par compensation :

La technique de découplage par compensation permet de découpler la régulation du couple et celle du flux.

Posons :

$$\begin{cases} E_d = \sigma L_s \omega_s i_{sq} + \frac{M}{L_r^2} R_r \phi_r \\ E_q = -\sigma L_s \omega_s i_{sd} - \frac{M}{L_r} \omega_s \phi_r \end{cases} \quad (\text{II-19})$$

En définissant deux variables de commande  $V_{sd1}$  et  $V_{sq1}$  telles que :

$$\begin{cases} V_{sd} = V_{sd1} - E_d \\ V_{sq} = V_{sq1} - E_q \end{cases} \quad (\text{II-20})$$

On a les expressions suivantes :

$$\begin{cases} V_{sd1} = \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + \left( R_s + \frac{M^2}{L_r^2} R_r \right) i_{sd} \\ V_{sq1} = \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \left( R_s + \frac{M^2}{L_r^2} R_r \right) i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II-21})$$

Et :

$$\begin{cases} \phi_r = \frac{M}{\sigma L_s} \frac{1}{(P+\lambda)(T_r P+1)} V_{sd1} \\ C_e = \frac{pM \phi_r}{\sigma L_s^2} \frac{1}{(P+\lambda)} V_{sq1} \end{cases} \quad (\text{II-22})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r} \quad (\text{II-23})$$

### II-4-2. Estimation de $C_e$ , $\phi_r$ , $\omega_s$ et $\theta_s$ :

Les estimateurs reposent sur l'utilisation d'une représentation de la machine sous forme d'équations de Park, définie en régime permanent ou transitoire, qui sont obtenus par une résolution directe des équations associées au modèle de la machine.

Le flux peut être estimé par :

$$\hat{\phi}_r = \frac{M}{1+T_r P} i_{sd} \quad (\text{II-24})$$

Le couple électromagnétique est estimé en fonction de  $\varphi_r$  par :

$$C_e = p \frac{M}{L_r} \hat{\varphi}_r i_{sq} \quad (\text{II-25})$$

La pulsation statorique  $\omega_s$  et la position  $\theta_s$  peuvent être calculées par :

$$\omega_s = p\Omega + \frac{M}{T_r} \frac{i_{sq}}{\hat{\varphi}_r} \quad (\text{II-26})$$

$$\theta_s = \int \omega_s dt \quad (\text{II-27})$$

### II-4-3. Structure de la commande :

A partir des équations développées précédemment nous pouvons élaborer un schéma complet de la stratégie de commande vectorielle à flux rotorique orienté comme le montre la figure II-4.

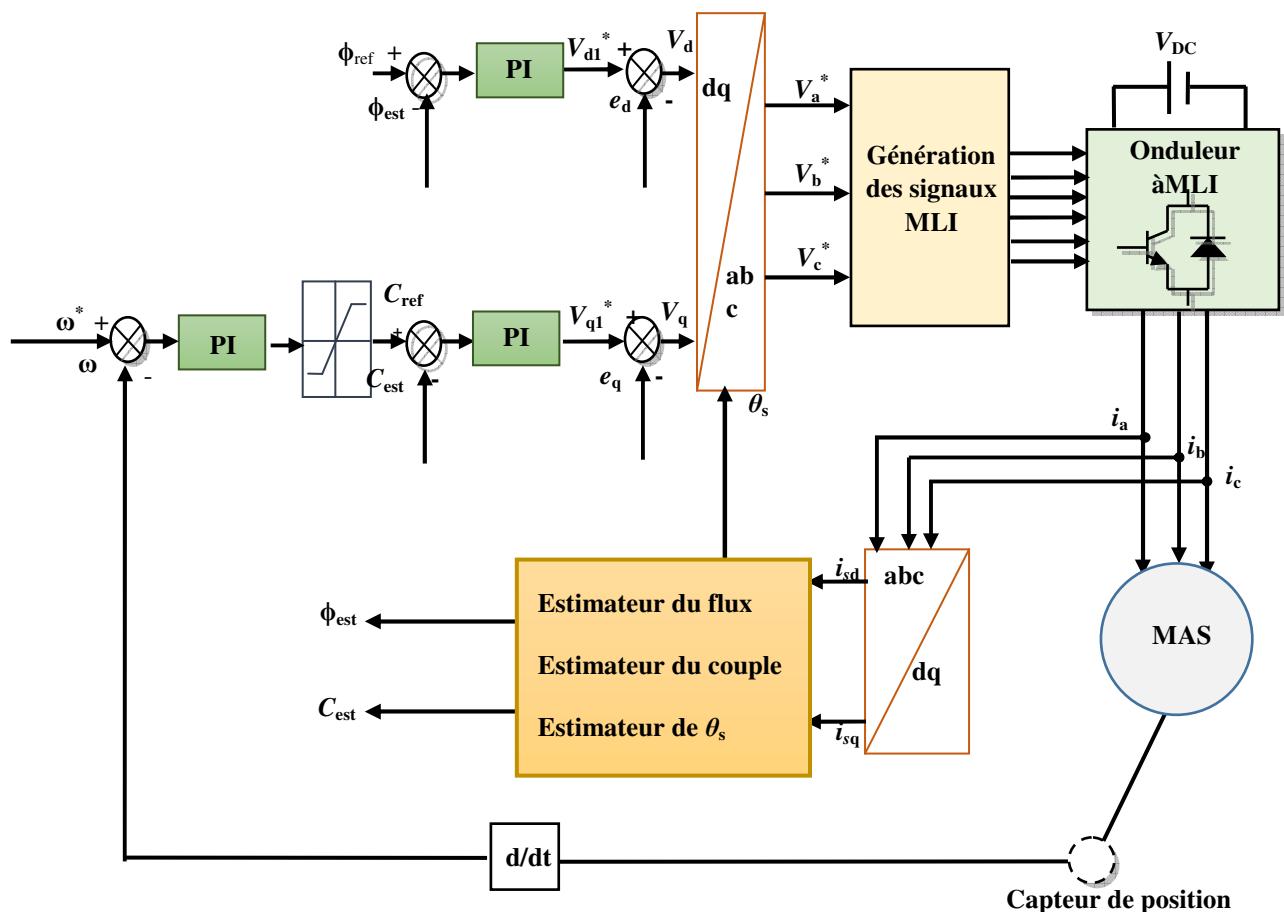


Fig. II- 4 Structure de la commande vectorielle à flux rotorique orienté.

Les principaux constituants de ce type de commande sont la boucle de régulation de vitesse et de couple, la boucle de régulation de flux, le bloc d'estimation et les transformations directe et inverse de Park. La vitesse est régulée à travers la boucle externe, la sortie de son régulateur et le couple de référence  $C_{ref}$ , ce dernier lui-même est contrôlé à travers un régulateur PI, afin d'assurer un contrôle de couple. La sortie de ce régulateur doit être limitée pour éviter un excès de tension de commande. En parallèle à cette boucle, on trouve aussi une boucle de régulation de flux qui

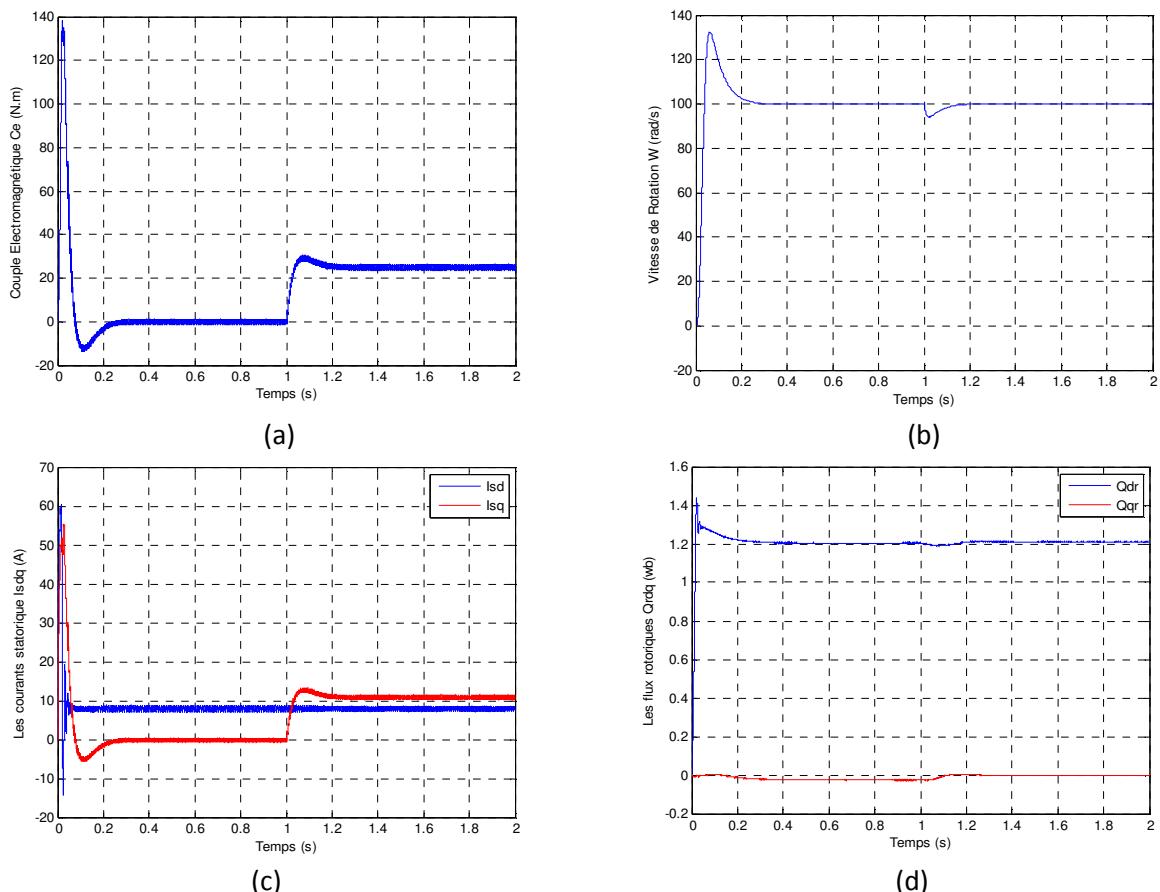
permet de maintenir le flux dans sa valeur de référence. Les tensions de référence  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  sont transformées à l'aide de la transformation de Park en grandeurs triphasées. L'onduleur MLI applique des créneaux de tensions dont les valeurs moyennes correspondent aux valeurs  $V_{sa}$ ,  $V_{sb}$  et  $V_{sc}$ . Les courants  $i_{sa}$  et  $i_{sb}$  sont mesurés et transformés en grandeurs  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  qui seront utilisées dans le bloc d'estimation.

### **Remarque :**

Les régulateurs à action proportionnelle-intégrale **PI** sont très répandus dans le domaine de la commande des machines électriques. L'action proportionnelle **P** assure la rapidité de la réponse dynamique et l'action intégrale **I** élimine l'erreur statique en régime permanent. En général, la synthèse et le dimensionnement des régulateurs **PI**, sont basés sur les méthodes de compensation ou de placement de pôles.

### **II-5. Exemple de simulation :**

La figure II-5, montre les résultats de simulation de la commande vectorielle d'une MAS alimentée en tension, avec une application d'un couple de charge  $C_r = 25 \text{ N.m}$  à l'instant  $t = 1\text{s}$ .



**Fig. II-5 Résultats de simulation de la commande vectorielle d'une MAS alimentée en tension.**  
**(a) : Couple électromagnétique, (b) : vitesse de rotation, (c) : Courants statoriques  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ ,**  
**(d) : Flux rotoriques d'axes  $d$  et  $q$ .**

Les résultats de simulation, montrent clairement le découplage de la commande entre le couple électromagnétique et le flux rotorique, traduit par la réponse des composantes  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  du courant statorique. Lors de l'application d'un échelon de charge, le couple suit parfaitement sa référence avec une influence sur la vitesse qui rejoint par la suite sa valeur de référence ( $\omega_{ref} = 100 \text{ rad/s}$ ).

Les paramètres de la machine asynchrone sont :

**$R_s=1.2\Omega$ ,  $R_r=1.8\Omega$ ,  $L_s=0.1554\text{H}$ ,  $L_r=0.1568\text{H}$ ,  $M=0.15\text{H}$ ,  $p=2$ ,  $J=0.07\text{Kg.m}^2$ ,  $f=0.0001\text{N.m/rad/s}$ ,**  
 **$I_n=15\text{A}$ ,  $C_{en}=25\text{N.m}$ ,  $P_n=4\text{KW}$ .**