Association de panneaux en strings parallèles dissymétriques

Et préférer le montage en un string série en cas de léger ombrage.

Nous allons calculer le comportement d'une installation avec un onduleur mono-mpp lorsque les panneaux sont disposés en de deux strings parallèles de modules câblés en série. Les règles de l'art demandent d'avoir deux strings identiques pour un bon équilibre des tensions.

Que se passe-t-il quand on rajoute un module supplémentaire sur une branche, réalisant ainsi une association déséquilibrée de N et N+ 1 modules? Bien sur ce n'est pas optimal, mais au moins *est ce qu'on récupère de la puissance additionnelle grâce à ce module excédentaire ?*

Pour simplifier le calcul, on supposera que tous les modules sont identiques. Evidemment, ce n'est jamais tout à fait exact, mais ceci ne remettra pas en cause la conclusion.

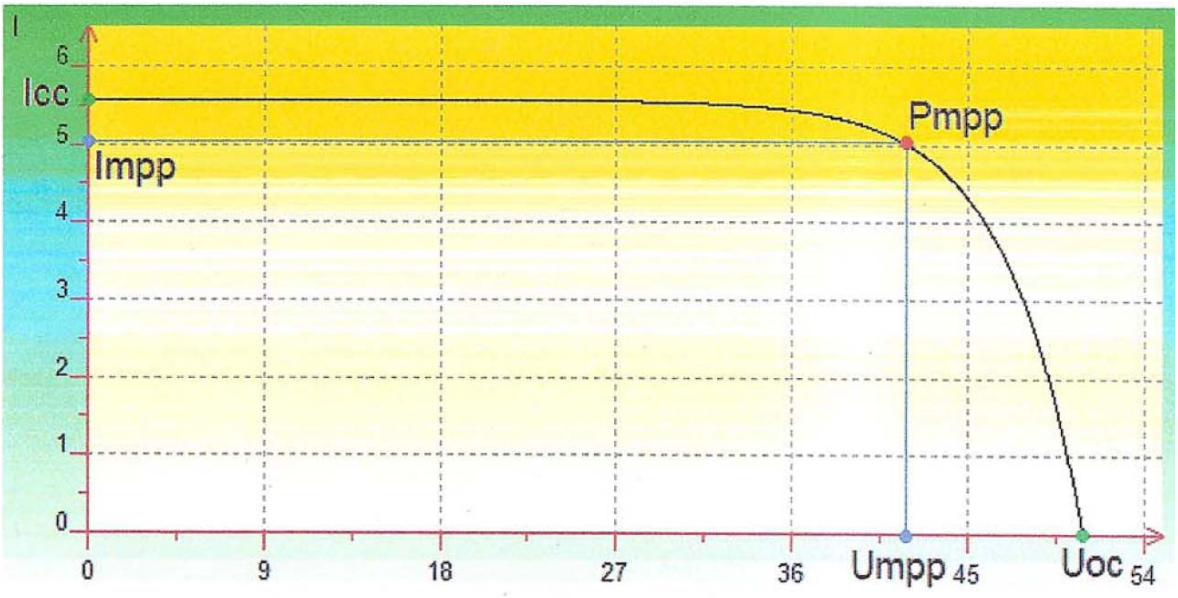
Pour l'ensemble de l'étude, nous prenons l'exemple de modules 210Wc de Sanyo. Ceci permet de fixer les caractéristiques. Les conclusions restent valables quel que soit le type de panneaux.

Détermination graphique

Dans un premier temps nous allons déterminer graphiquement le point de puissance maximale de l'association des deux strings // dissymétriques

Concrètement, les caractéristiques des panneaux peuvent être présentées selon deux modes :
Caractéristiques I=f(U) ou alors P = f(U)

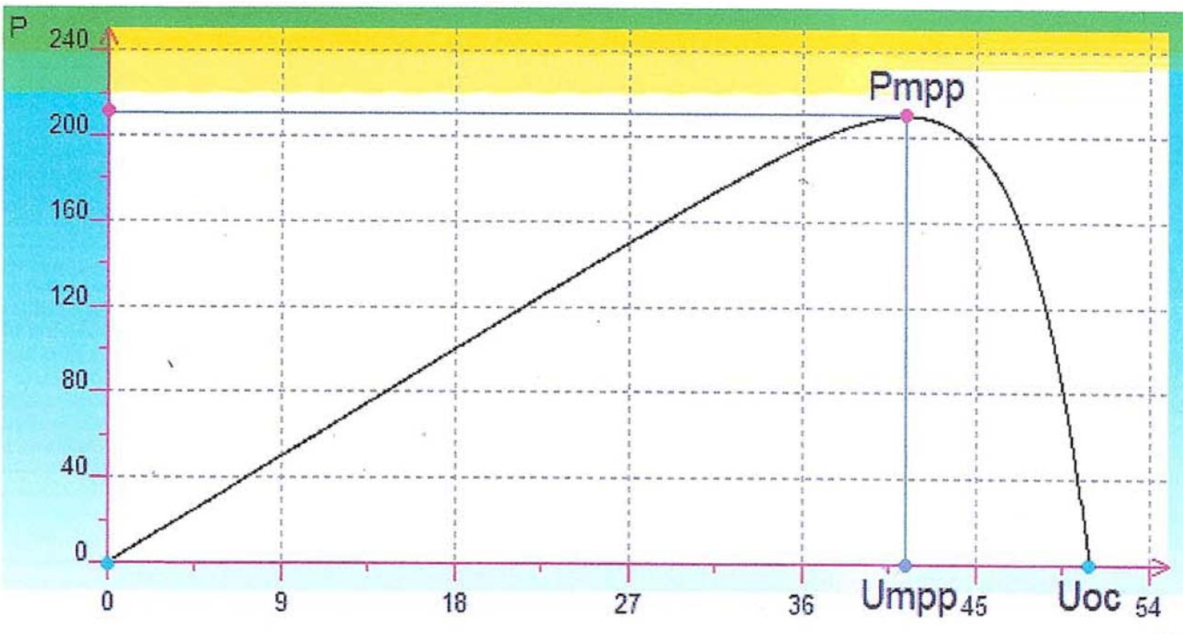
Voici la caractéristique d'un panneau sous conditions standard (STC : 25°C, 1000W/m²).
On y repère quatre valeurs caractéristiques : Icc, Uoc, Impp, Umpp.
On en déduit Pmpp = Impp.Umpp



Caractéristique I = f(U)

fig. 1

Une représentation équivalente qui nous servira pour la suite consiste à tracer la puissance en fonction de la tension. Cette puissance culmine pour U=Umpp à une valeur maximale Pmpp sur laquelle l'onduleur va se fixer. En ce point, on a évidemment Impp = Pmpp/Umpp.



Caractéristique P = f(U)

fig. 2

Ceci correspond à un panneau unique.

Prenons l'hypothèse d'un premier string de 7 panneaux (par exemple). Les panneaux sont en série et donc pour un même courant, les tensions s'additionnent. Sur la fig. 1, l'axe des tensions devient gradué en x7. Sur la fig. 2, les axes de puissance et de tension sont gradués en x7.
Ainsi, le point de mpp se trouve à Umpp =7x41.4 = 290V et Pmpp=7x210 = 1470W. Impp reste égal à 5.07 A dans tous les cas.
De la même façon, il est possible de déterminer les caractéristiques d'un string de 8 panneaux : Umpp et Pmpp sont multipliés par 8 et Impp est inchangé.

Voici les caractéristiques des deux strings portées sur un même graphique.

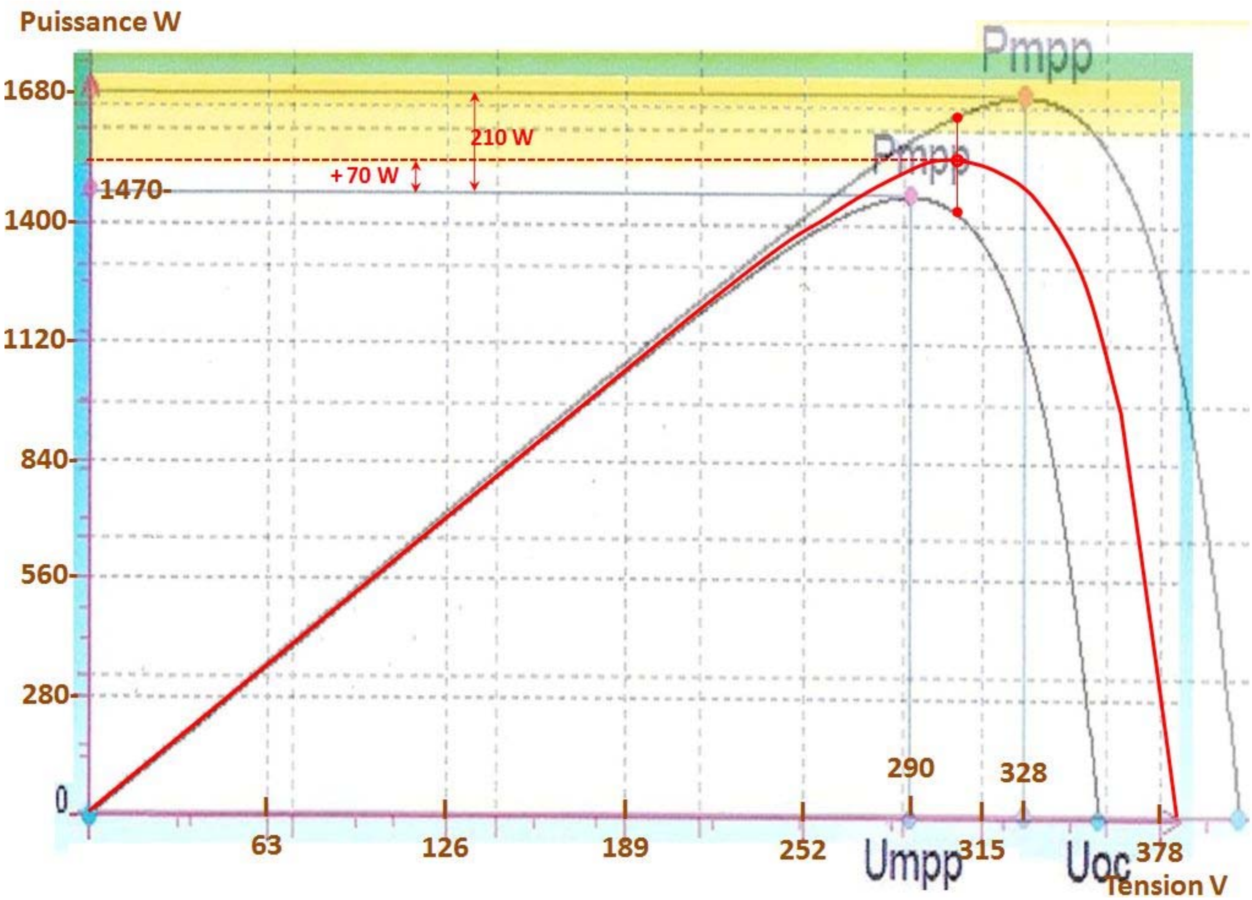


fig. 3

Comme les deux strings sont en parallèle, la tension à leurs bornes est identique, et les courants s'additionnent. De ce fait il en est de même pour les puissances. En rouge est tracée la courbe obtenue en faisant la demi somme (P1+P2)/2 des puissances de chacun des strings (il suffit de prendre le point milieu). On observe que la courbe rouge culmine à un point de mpp sur lequel l'onduleur va se verrouiller. Ce point se trouve à 70W au dessus du Pmpp du string à 7 panneaux et à 140W en dessous du Pmpp du string à 8 panneaux. (soit 1/3 - 2/3).
La puissance fournie par l'association est la somme des puissances P1+P2. Soient 2 x (1470+70) = 3080 W.

On conclut donc que l'ajout d'un panneau excédentaire dans le string 2 rajoute une fraction de puissance à l'ensemble égale dans ce cas aux 2/3 de la puissance du panneau rajouté.

Le string 1 a 7 panneaux produira environ 1440W et le string 2 à 8 panneaux environ 1640W (respectivement à 30 et 40W en dessous du maximum de chacun considéré isolément).

Démonstration analytique

Pour la simplicité des notations, écrira U_0 tension d'un panneau au mpp, I_0 courant du panneau au mpp, P_0 puissance du panneau au mpp, optimisation faite sur un panneau individuel unique.

On se doute bien que l'association déséquilibrée N N+ 1 des deux branches va conduire à un point de fonctionnement non optimum. Ainsi, la tension de l'ensemble sera très certainement comprise quelque part entre $N.U_0$ et $(N+1).U_0$

Pour faire le calcul, on approxime la courbe P(U), ie la seconde courbe, au voisinage de U_0, P_0 par une parabole, avec la courbure k ($k= dP/dU^2$) calculée pour un panneau individuel). Ceci donne :

$P_1= N.P_0-k.N(U_1-U_0)^2$ Ou U_1 est la tension (non optimale) de chacun des panneaux du string 1 et P_1 la puissance délivrée par ce string N°1
$P_2=(N+1).P_0-k.(N+1)(U_2-U_0)^2$ Ou U_2 est la tension (non optimale) de chacun des panneaux du string 2 et P2 la puissance délivrée par ce string N°2.

La tension U des deux strings est commune car ils sont connectés en // : $N.U_1=(N+1).U_2=U$
La puissance totale est $P=P_1+P_2$

On remplace U_1 et U_2 par resp. $U_1=U/N$ et $U_2=U/(N+1)$ dans les expressions de P_1 et P_2, on fait la somme et on a P en fonction de U :
$P=(2N+1).P_0-k.[(U^2-2.N.U.U_0+N^2.U_0^2)/N+(U^2-2(N+1).U.U_0+(N+1)^2U_0^2)/(N+1)]$

L'onduleur va rechercher le point à puissance max de cette association. On peut le déterminer en écrivant que P est maximum, ie que la dérivée P(U) s'annule en ce point.
Au maximum $dP/dU=0 \rightarrow (2.U-2.N.U_0)/N + (2.U-2(N+1)U_0)/(N+1) = 0$
ou encore $(N+1)(U-NU_0) + N(U-(N+1)U_0) = 0$ i.e. $(2N+1)U = 2N(N+1)U0$

Ceci donne U, tension de cette association : **$U= NU_0.(N+1)/(N+1/2)$**

Ce qui s'écrit aussi **$U=N.U_0+U_0/(2+1/N)$** c'est à dire que la tension commune est quasiment à mi chemin entre la tension optimale du string 1 (qui est $N.U_0$) et celle du string 2 qui est $N.U_0+U_0$.
En première approximation, on a **$U\approx(N+0,5)U0$**. Ceci est d'autant plus vrai que N est élevé. Par ex si N=16, on a $U= (N+0,485)U_0$ et pour notre exemple graphique, avec N=7, on obtient $U=(N+0,467)U_0$.

Chacun des panneaux n'est pas exactement à la tension optimale.

Dans le string 1 chacun des N panneaux voit une tension un peu élevée.
L'écart $\delta U_1=U/N-U_0$ est $\delta U_1=U_0/(2N+1)$.
Dans le string 2 chacun des N+1 panneaux voit une tension un peu basse.
L'écart $\delta U_2=U/(N+1)-U_0$ est $\delta U_2=-U_0/(2N+1)$ soit $\delta U_2=-\delta U_1$

On peut remettre cette valeur de U dans la formule qui donne P (ci dessus) On obtient:
$P=(2N+1).P_0-\delta P$ avec $\delta P=k.\delta U_2^2 = k.U_0^2/(2N+1)$

Autrement dit, la puissance totale est égale à la somme des puissances des strings associés moins un terme correctif. On peut calculer ce terme si on détermine k.

Une façon simple d'évaluer le terme correctif est de se placer sur la courbe P(V) de la figure 2.
A 36V et 45V, on a une puissance de 197W environ. Pour $.\delta U=4.5V$, on a $.\delta P=13W$ donc $k=13/4{,}5^2 = 0{,}64W/V^2$. Le terme correctif est donc $-0{,}64 \times 41^2 / (2N+1) = -72W$ pour N=7.

On retrouve donc analytiquement les mêmes résultats que ceux de l'analyse graphique : Le panneau excédentaire apporte une puissance supplémentaire d'environ 2/3 de la puissance du panneau.

L'intérêt du résultat analytique, c'est *de permettre d'extrapoler* à un nombre N de panneaux.

Par exemple avec 20 panneaux et 21 panneaux, la puissance perdue est seulement de 25W.
La perte diminue quand le nombre de panneaux augmente, ce qui est facilement explicable, puisque l'écart a l'optimum pour chaque panneau varie comme $U_0/(2N+1)$

Facteur d'échelle

Supposons maintenant que nous prenions des panneaux contenant des cellules identiques, mais avec un nombre différent de cellules. Soit λ le facteur d'échelle. Pour un panneau λ fois plus grand, l'axe des tensions va être multiplié par λ, les courants restent les mêmes et donc l'axe des puissances va être multiplié par λ. Pour ces « nouveaux », le coefficient k va varier comme $\lambda P/\lambda^2U^2$, c'est-à-dire comme $1/\lambda$. On aura donc $\delta P' = k'U'^2_0/(2N'+1) = (k/\lambda)\lambda^2U_0^2/(2N'+1) = k\lambda U_0^2/(2N'+1)$

Soient $\delta P' = \lambda\ \delta P\ (2N+1)/(2N'+1)$ δP et N sont les valeurs calculées pour les panneaux « standards »

Par exemple si nous prenons $\lambda=1/3$ [panneaux plus petits], avec un string à 20 panneaux et un string à 21 panneaux (de 70Wc chacun), nous aurons une perte de
1/3 x 72W (15/42) = 8.57W

Application aux strings symétriques ombrés.

Imaginons une configuration de deux strings // de 7 panneaux. Un des panneaux est ombré et une cellule est occultée. Grace aux diodes by-pass, *les deux tiers du panneau sont encore opérationnels*. Tout se passe comme si nous avions deux strings comportant 21 tiers de panneaux et 20 tiers de panneaux. On a vu ci-dessus que la puissance était la somme de P1 (20x70=1400W) et de P2 (21x70=1470W) moins un terme correctif de 8.57W soient 2870-8.57 = 2861.43W. On perd donc en tour 70+8.57W=78.53W

Les 8.57W supplémentaires sont perdus du fait du déséquilibre créé entre les deux branches en parallèle.

Ce phénomène chiffre la perte supplémentaire qui n'existe pas si les panneaux sont en série.

En cas d'ombrage, le montage série est donc a préférer
quand c'est possible et que l'onduleur est adapté.