

GÉNÉRATEUR PWM SVM TRIPHASÉ POUR MOTEUR BLDC

Principe de la modulation SV

L'acronyme SVM provient de "Space Vector Modulation". Il s'agit d'un procédé de PWM permettant d'appliquer au moteur une tension entre phases de forme sinusoïdale et d'amplitude égale à la tension DC appliquée aux 3 bras de l'interface de puissance. Le gain est de 15% par rapport au procédé PWM sinusoïdal conventionnel.

On utilise la structure classique des 3 bras de commutateurs commandés par 3 comparateurs. Le signal de référence est de forme triangulaire et de fréquence F_{PWM} très grande devant la fréquence des signaux u_a , u_b et u_c (au moins 20x).

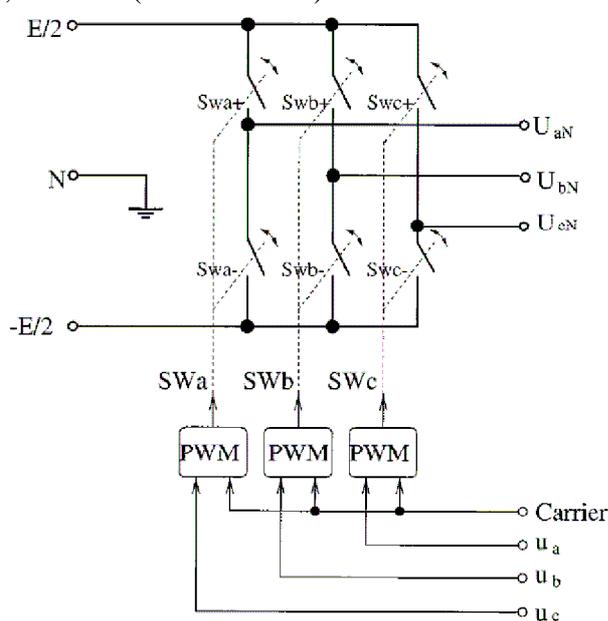


Fig. 2. Three-phase PWM inverter.

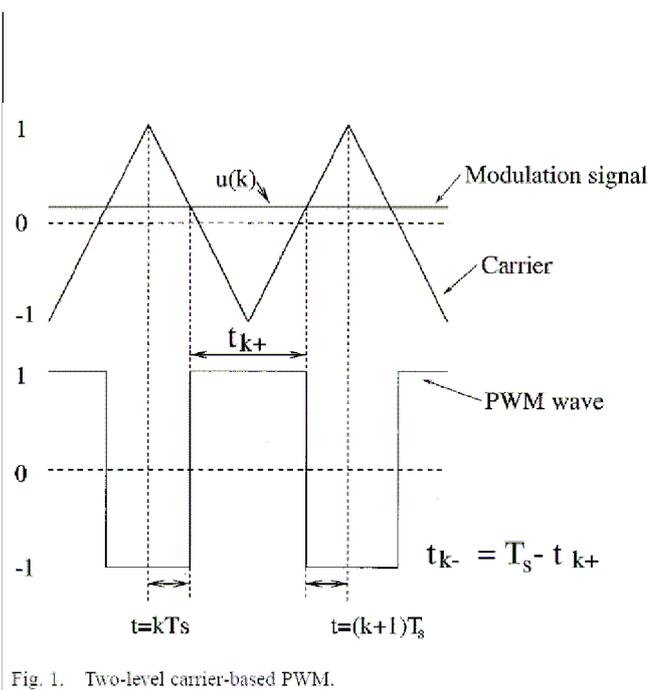


Fig. 1. Two-level carrier-based PWM.

Dans ces conditions on peut écrire (commutateurs parfaits) :

$$U_{an\text{ moy}} = \frac{E}{2} \times u_a, U_{bn\text{ moy}} = \frac{E}{2} \times u_b \text{ et } U_{cn\text{ moy}} = \frac{E}{2} \times u_c$$

Les valeurs instantanées de u_a , u_b et u_c doivent rester à l'intérieur des valeurs crêtes de la porteuse ("carrier").

En éliminant les composantes harmoniques (fréquences multiples de F_{PWM}), et si F_{PWM} est très grande devant la fréquence des signaux u_a , u_b et u_c , **on peut confondre $U_{an\text{ moy}}$ et U_{an} .**

1. PWM sinusoïdal

On produit 3 consignes sinusoïdales déphasées de 120° :

$$u_a = m \times \sin(\omega t) \quad u_b = m \times \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad u_c = m \times \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)$$

m : indice de modulation compris entre 0 et 1

Il en résulte :

$$U_{aN} = \frac{E}{2} \times m \times \sin(\omega t) \quad U_{bN} = \frac{E}{2} \times m \times \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad U_{cN} = \frac{E}{2} \times m \times \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)$$

CQFD

Les tensions entre phases sont :

$$U_{ab} = \frac{E}{2} \sqrt{3} \times m \times \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$U_{bc} = \frac{E}{2} \sqrt{3} \times m \times \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{6}\right)$$

$$U_{ca} = \frac{E}{2} \sqrt{3} \times m \times \sin\left(\omega t + \frac{3\pi}{2}\right)$$

L'amplitude maximum entre phases est donc de $\frac{E}{2} \sqrt{3}$, soit 86,6% de E pour m=1.

2. Modulation Space Vector

Les 6 commutateurs peuvent prendre 2^3 états différents représentés dans la figure ci-contre.

Ces 8 états sont codés de S0 à S7. La modulation "SV" consiste à piloter les commutateurs en PWM pour passer progressivement d'un état au suivant.

Les 3 sorties a, b et c alimentent les 3 phases du moteur qui créent des champs magnétiques déphasés de 120° .

On peut alors représenter l'orientation du champ magnétique pour chacun des 8 états. Ces états se transforment alors en **vecteurs** de tension (\vec{U}_0 à \vec{U}_7 sur la figure ci-contre).

Les états S0 et S7 ne créent pas de champ magnétique, les vecteurs \vec{U}_0 et \vec{U}_7 ont donc une longueur nulle.

Les autres vecteurs ont une longueur de 1 et respectent les relations suivantes :

$$\vec{U}_1 = -\vec{U}_4$$

$$\vec{U}_2 = -\vec{U}_5$$

$$\vec{U}_3 = -\vec{U}_6$$

$$\vec{U}_1 + \vec{U}_3 + \vec{U}_5 = 0$$

Objectif : créer un vecteur \vec{U} de longueur constante qui suit, pour sa valeur maxi, le

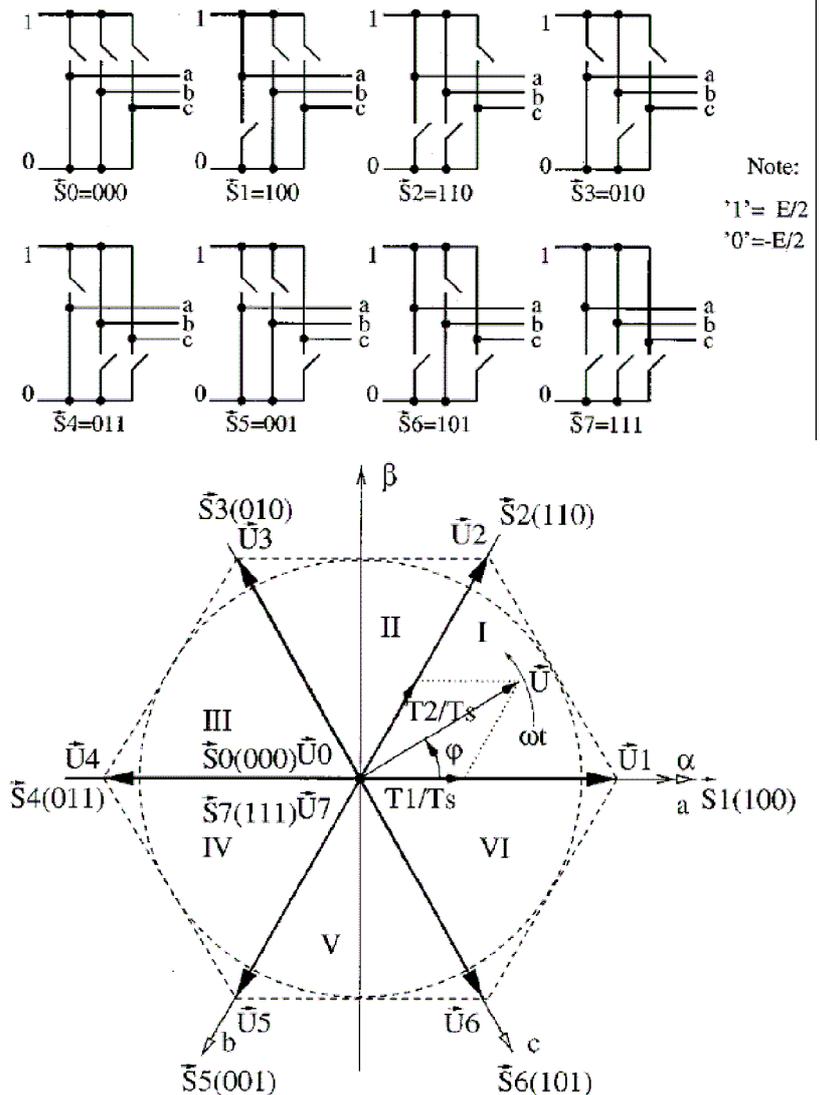
cercle en pointillé de rayon $\frac{\sqrt{3}}{2}$.

Pour cela on module en conséquence les rapports cycliques de conduction des commutateurs dans chacun des 6 secteurs.

En notant T_0 à T_7 la durée de chaque état S_0 à S_7 sur une période PWM, on obtient la relation vectorielle suivante (on suppose que la fréquence PWM est très grande devant la vitesse de rotation du vecteur \vec{U} :

$$\vec{U} = \frac{T_0}{T_S} \vec{U}_0 + \frac{T_1}{T_S} \vec{U}_1 + \frac{T_2}{T_S} \vec{U}_2 + \frac{T_3}{T_S} \vec{U}_3 + \frac{T_4}{T_S} \vec{U}_4 + \frac{T_5}{T_S} \vec{U}_5 + \frac{T_6}{T_S} \vec{U}_6 + \frac{T_7}{T_S} \vec{U}_7$$

Avec $T_S = T_0 + T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7$: période PWM

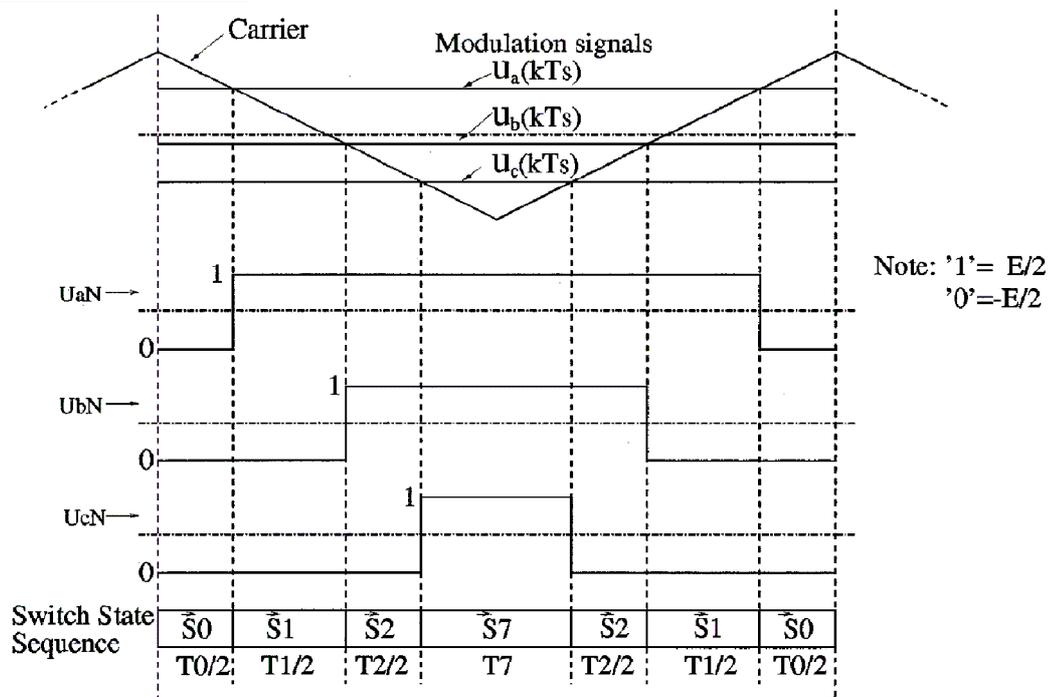


Pour respecter cette relation à la lettre et donc atteindre l'objectif, il faut calculer les durées T_0 à T_7 pour chaque position angulaire de \vec{U} . On en déduit les consignes de tension u_a , u_b et u_c nécessaires. Ce procédé n'est pas utilisé car il provoque de trop nombreux changements d'états (32 par période PWM) et les pertes par commutation deviennent excessives.

Solution adoptée :

- Le diagramme vectoriel est divisé en 6 secteurs de 60°
- Dans chaque secteur, seuls 4 vecteurs \vec{U}_i sont utilisés pour produire \vec{U} (les 2 vecteurs qui encadrent le secteur, ainsi que \vec{U}_0 et \vec{U}_7) :
 - secteur I : $\vec{U} = \frac{T_0}{T_S} \vec{U}_0 + \frac{T_1}{T_S} \vec{U}_1 + \frac{T_2}{T_S} \vec{U}_2 + \frac{T_7}{T_S} \vec{U}_7$ Avec $T_S = T_0 + T_1 + T_2 + T_7$: période PWM
 - secteur II : $\vec{U} = \frac{T_0}{T_S} \vec{U}_0 + \frac{T_2}{T_S} \vec{U}_2 + \frac{T_3}{T_S} \vec{U}_3 + \frac{T_7}{T_S} \vec{U}_7$ Avec $T_S = T_0 + T_2 + T_3 + T_7$
 - secteur III : $\vec{U} = \frac{T_0}{T_S} \vec{U}_0 + \frac{T_3}{T_S} \vec{U}_3 + \frac{T_4}{T_S} \vec{U}_4 + \frac{T_7}{T_S} \vec{U}_7$ Avec $T_S = T_0 + T_3 + T_4 + T_7$
 - secteur IV : $\vec{U} = \frac{T_0}{T_S} \vec{U}_0 + \frac{T_4}{T_S} \vec{U}_4 + \frac{T_5}{T_S} \vec{U}_5 + \frac{T_7}{T_S} \vec{U}_7$ Avec $T_S = T_0 + T_4 + T_5 + T_7$
 - secteur V : $\vec{U} = \frac{T_0}{T_S} \vec{U}_0 + \frac{T_5}{T_S} \vec{U}_5 + \frac{T_6}{T_S} \vec{U}_6 + \frac{T_7}{T_S} \vec{U}_7$ Avec $T_S = T_0 + T_5 + T_6 + T_7$
 - secteur VI : $\vec{U} = \frac{T_0}{T_S} \vec{U}_0 + \frac{T_6}{T_S} \vec{U}_6 + \frac{T_1}{T_S} \vec{U}_1 + \frac{T_7}{T_S} \vec{U}_7$ Avec $T_S = T_0 + T_6 + T_7 + T_1$
- A un instant donné, l'angle magnétique du moteur se trouve dans un des 6 secteurs. On calcule alors les rapports cycliques nécessaires pour placer le vecteur \vec{U} dans cette position. Cette solution ne nécessite que 12 changements d'états par période PWM (pertes plus faibles) et réduit aussi le nombre de calculs nécessaires.

Par exemple, dans le secteur I :



$$\vec{U} = \frac{T_0}{T_S} \vec{U}_0 + \frac{T_1}{T_S} \vec{U}_1 + \frac{T_2}{T_S} \vec{U}_2 + \frac{T_7}{T_S} \vec{U}_7 \text{ Avec } T_S = T_0 + T_1 + T_2 + T_7 : \text{période PWM}$$

Quand le vecteur \vec{U} se déplace de 0° à 60° , la durée T_1 de S_1 varie du max à 0 tandis que la durée T_2 de S_2 varie de 0 au max.

On choisit généralement : $T_0 = T_7$ pour des raisons de symétrie et limiter les composantes harmoniques.

Pour obtenir un vecteur \vec{U} de longueur m (m est l'indice de modulation), on calcule T_0 , T_1 , T_2 et T_7 à partir du diagramme vectoriel :

$$\frac{T_1}{T_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} \times m \times \sin\left(\frac{\pi}{3} - \varphi\right) = \frac{2}{\sqrt{3}} \times m \times \sin\left(\frac{\pi}{3} - \omega \times t\right)$$

$$\frac{T_2}{T_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} \times m \times \sin(\varphi) = \frac{2}{\sqrt{3}} \times m \times \sin(\omega \times t)$$

$$\frac{T_0}{T_S} = \frac{T_7}{T_S} = \frac{T_S - (T_1 + T_2)}{2}$$

On en déduit :

$$PWMa = \frac{T_0}{T_S}$$

$$PWMb = \frac{T_1 + T_0}{T_S}$$

$$PWMc = \frac{T_0 + T_1 + T_2}{T_S} = \frac{T_S - T_7}{T_S}$$

Pour ne pas obtenir des durées T_0 et T_7 négatives (irréalisables !), le vecteur \vec{U} doit rester à l'intérieur de l'hexagone. Le cas limite est obtenu à $\varphi = 30^\circ$: on obtient $T_1 = T_2 = T_S/2$ et $T_0 = T_7 = 0$ quand le vecteur \vec{U} est sur le cercle en pointillé de rayon $\frac{\sqrt{3}}{2}$.

L'indice de modulation m doit donc rester inférieur à $m_{\max} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866$

Pour cette valeur m_{\max} , on obtient :

- amplitude de U_a , U_b et $U_c = \frac{E}{2} \times m_{\max} = \frac{\sqrt{3}}{4} \times E = 0,433 \times E$
- amplitude de U_{ab} , U_{bc} et $U_{ca} = \frac{E}{2} \sqrt{3} \times m_{\max} = E$

Conclusion : les amplitudes sont augmentées de 15,5% par rapport au PWM sinusoïdal conventionnel.

3. Durées des états des commutateurs dans chaque secteur

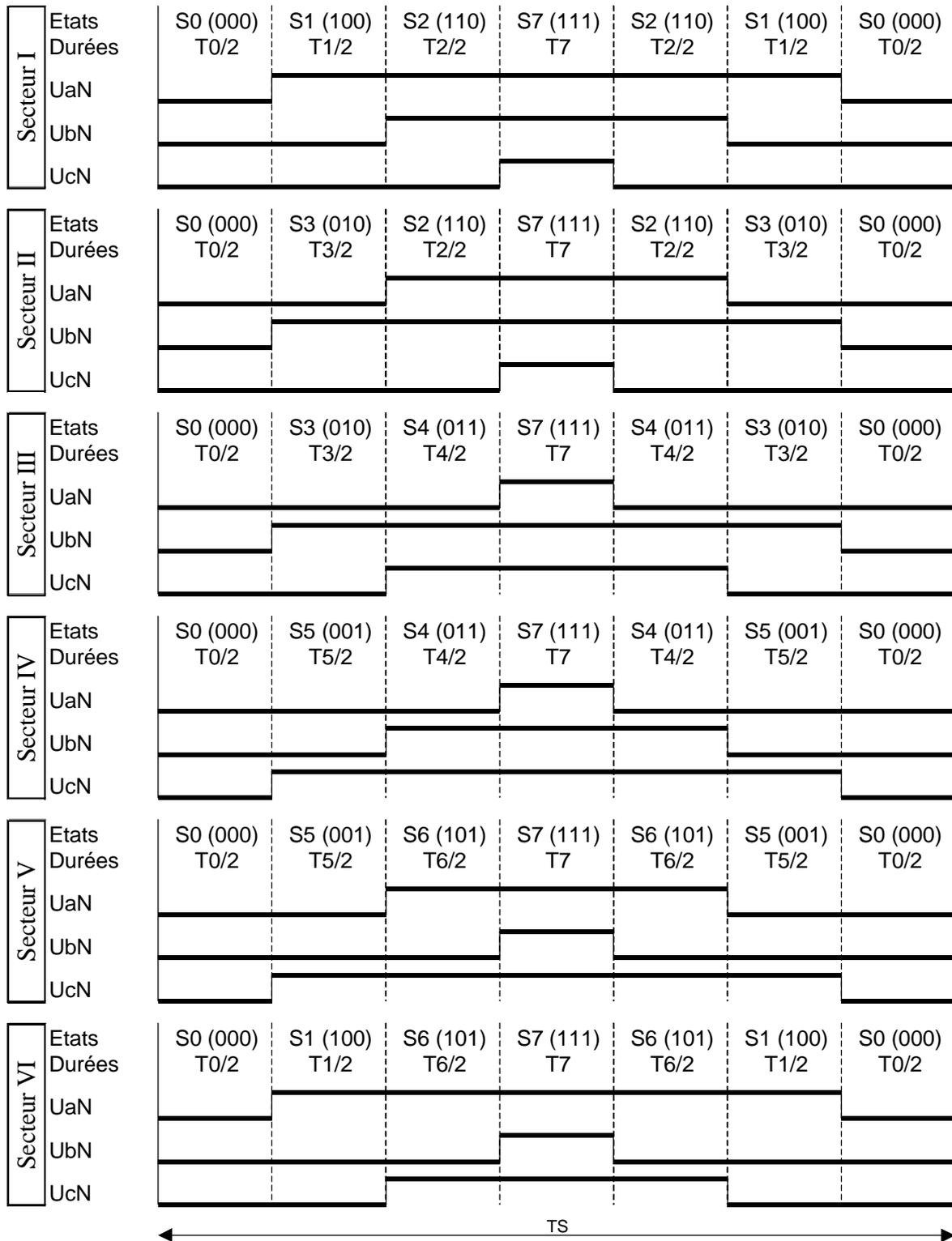
Une simple transposition d'angle permet de calculer les durées T_0 à T_7 des états S_0 à S_7 dans chacun des secteurs :

Secteur I ($0 \leq \varphi \leq \pi/3$)	Secteur II ($\pi/3 \leq \varphi \leq 2\pi/3$)	Secteur III ($2\pi/3 \leq \varphi \leq \pi$)
$\frac{T_1}{T_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \varphi\right)$	$\frac{T_2}{T_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} m \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \varphi\right)$	$\frac{T_3}{T_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} m \cdot \sin(\pi - \varphi)$
$\frac{T_2}{T_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} m \cdot \sin(\varphi)$	$\frac{T_3}{T_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} m \cdot \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{3}\right)$	$\frac{T_4}{T_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} m \cdot \sin\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right)$
$\frac{T_0}{T_S} = \frac{T_7}{T_S} = \frac{T_S - (T_1 + T_2)}{2 \cdot T_S}$	$\frac{T_0}{T_S} = \frac{T_7}{T_S} = \frac{T_S - (T_2 + T_3)}{2 \cdot T_S}$	$\frac{T_0}{T_S} = \frac{T_7}{T_S} = \frac{T_S - (T_3 + T_4)}{2 \cdot T_S}$
Secteur IV ($\pi \leq \varphi \leq 4\pi/3$)	Secteur V ($4\pi/3 \leq \varphi \leq 5\pi/3$)	Secteur VI ($5\pi/3 \leq \varphi \leq 2\pi$)
$\frac{T_4}{T_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} m \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{3} - \varphi\right)$	$\frac{T_5}{T_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} m \cdot \sin\left(\frac{5\pi}{3} - \varphi\right)$	$\frac{T_6}{T_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} m \cdot \sin(2\pi - \varphi)$
$\frac{T_5}{T_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} m \cdot \sin(\varphi - \pi)$	$\frac{T_6}{T_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} m \cdot \sin\left(\varphi - \frac{4\pi}{3}\right)$	$\frac{T_1}{T_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} m \cdot \sin\left(\varphi - \frac{5\pi}{3}\right)$
$\frac{T_0}{T_S} = \frac{T_7}{T_S} = \frac{T_S - (T_4 + T_5)}{2 \cdot T_S}$	$\frac{T_0}{T_S} = \frac{T_7}{T_S} = \frac{T_S - (T_5 + T_6)}{2 \cdot T_S}$	$\frac{T_0}{T_S} = \frac{T_7}{T_S} = \frac{T_S - (T_6 + T_1)}{2 \cdot T_S}$

On constate que les calculs donnent des résultats identiques dans chaque secteur ce qui simplifie la réalisation du modulateur.

4. Succession des états des commutateurs dans chaque secteur

Les solutions sont multiples, mais on s'impose le critère suivant : **pas de changement d'état simultané de 2 bras**. On obtient les résultats suivants :



5. Calculs des rapports cycliques dans chaque secteur

Ces calculs étant numériques, il est nécessaire de fixer la résolution de l'angle magnétique du moteur. Dans l'exemple qui suit la résolution choisie est de $360/(6 \times 256) = 0,234^\circ$.

Il serait possible de calculer les 3 rapports cycliques de chaque bras pour les $6 \times 256 = 1536$ angles élémentaires et les ranger dans une table en mémoire morte. Cette solution est rejetée car la taille de la table excède les possibilités de l'EPLD. Celle-ci n'intègre que 12288 bits alors que la table nécessite $1536 \times 3 \times 8$ bits (3 rapports cycliques codés sur 8 bits) = 36864 bits.

Les symétries dans le diagramme vectoriel permettent de réduire la taille de la table, mais au détriment de calculs supplémentaires que l'EPLD doit exécuter.

Les 2 tables utilisées permettent de déterminer les rapports cycliques T_A/T_S et T_B/T_S dans un secteur :

$$\text{Table } T_A : \frac{T_A}{T_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} \times m \times \sin\left(\frac{\pi}{3} - \varphi\right)$$

$$\text{Table } T_B : \frac{T_B}{T_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} \times m \times \sin(\varphi) \quad \text{pour } 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{3}$$

La correspondance entre les temps T_i et T_A ou T_B est donnée dans le tableau ci-dessous :

Sect.	Période PWM	T_A	T_B	UaN PWMa	UbN PWMb	UcN PWMc
I	$T_S = T_1 + T_2 + T_0 + T_7$	T1	T2	$\frac{T_0}{T_S}$	$\frac{T_0 + T_1}{T_S} = \frac{T_0 + T_A}{T_S}$	$\frac{T_S - T_7}{T_S} = \frac{T_S - T_0}{T_S}$
II	$T_S = T_2 + T_3 + T_0 + T_7$	T2	T3	$\frac{T_0 + T_3}{T_S} = \frac{T_0 + T_B}{T_S}$	$\frac{T_0}{T_S}$	$\frac{T_S - T_7}{T_S} = \frac{T_S - T_0}{T_S}$
III	$T_S = T_3 + T_4 + T_0 + T_7$	T3	T4	$\frac{T_S - T_7}{T_S} = \frac{T_S - T_0}{T_S}$	$\frac{T_0}{T_S}$	$\frac{T_0 + T_3}{T_S} = \frac{T_0 + T_A}{T_S}$
IV	$T_S = T_4 + T_5 + T_0 + T_7$	T4	T5	$\frac{T_S - T_7}{T_S} = \frac{T_S - T_0}{T_S}$	$\frac{T_0 + T_5}{T_S} = \frac{T_0 + T_B}{T_S}$	$\frac{T_0}{T_S}$
V	$T_S = T_5 + T_6 + T_0 + T_7$	T5	T6	$\frac{T_0 + T_5}{T_S} = \frac{T_0 + T_A}{T_S}$	$\frac{T_S - T_7}{T_S} = \frac{T_S - T_0}{T_S}$	$\frac{T_0}{T_S}$
VI	$T_S = T_6 + T_1 + T_0 + T_7$	T6	T1	$\frac{T_0}{T_S}$	$\frac{T_S - T_7}{T_S} = \frac{T_S - T_0}{T_S}$	$\frac{T_0 + T_1}{T_S} = \frac{T_0 + T_B}{T_S}$

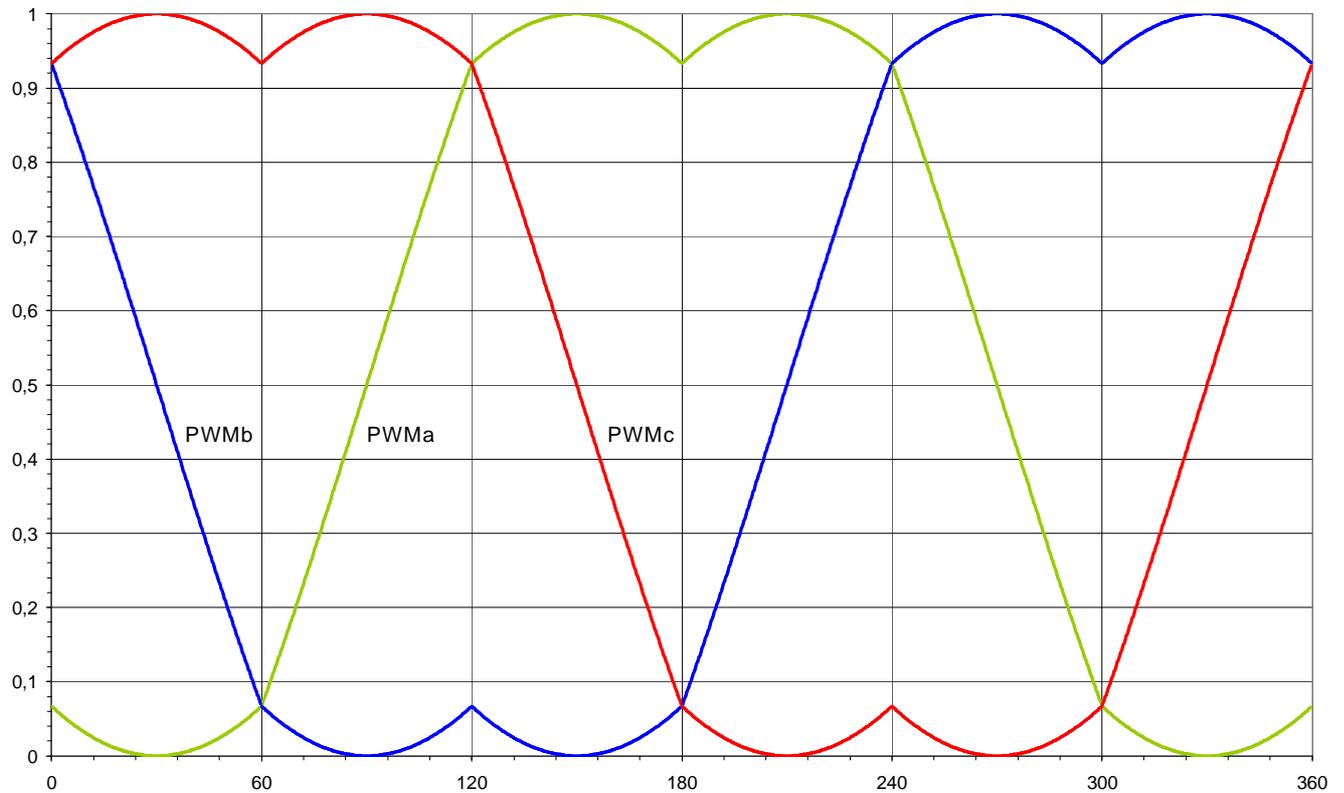
Le rapport cyclique T_0/T_S est calculé comme suit :

$$\frac{T_0}{T_S} = \frac{T_7}{T_S} = \frac{T_S - (T_A + T_B)}{2 \cdot T_S} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{T_A}{T_S} - \frac{T_B}{T_S} \right)$$

6. Simulation Excel

Le tableau Excel est utilisé pour valider les tables de valeurs des rapports cycliques. Le fichier "Table_TA_TB_T0.xls" comporte les tables et les formules de calcul décrites précédemment. On obtient les résultats suivants sur 360° magnétiques :

Les 3 rapports cycliques



Les 3 tensions inter-phases (relativement à E)

