

RÉGIME TRIPHASÉ ÉQUILIBRÉ

1 -Pourquoi alimenter en triphasé ?.....	2
1.1 -Intérêt pour le fournisseur d'énergie électrique.....	2
1.2 -Intérêt pour les moteurs asynchrones.....	2
2 -Tensions triphasées équilibrées.....	3
2.1 -Systèmes direct, inverse et homopolaire.....	3
2.2 -Tensions simples / composées.....	4
3 -Charge linéaire triphasée équilibrée.....	5
3.1 -Comment choisir le couplage d'une charge ?.....	5
4 -Courants triphasés équilibrés.....	6
4.1 -Courant de ligne, courant de phase.....	6
4.2 -Courant dans le fil de Neutre.....	6
5 -Puissances en triphasé équilibré.....	7
5.1 -Expression des puissances au niveau de la charge.....	7
5.2 -Expression des puissances sur les lignes.....	7
5.3 -Pertes Joules en triphasé.....	8
5.4 -Compensation de puissance réactive.....	9
6 -Branchements d'un wattmètre.....	10
6.1 -Représentation d'un wattmètre monophasé sur un schéma.....	10
6.2 -Mesures avec un wattmètre TRIPHASÉ.....	10
6.3 -Mesure des puissances triphasées avec un wattmètre MONOPHASÉ.....	11
6.3.1 -Réseau 3P+N	11
6.3.2 -Réseau 3P - charge équilibrée.....	11
6.3.3 -Réseau 3P - charge déséquilibrée - méthode des 2 wattmètres.....	11
7 -Mesure des tensions, courant et puissances.....	13
7.1 -La mesure de la tension.....	13
7.2 -La mesure du courant.....	13
7.3 -La mesure des puissances.....	14



1 - POURQUOI ALIMENTER EN TRIPHASÉ ?

En monophasé, une charge est alimentée par 2 fils : phase et neutre.

En triphasé, on alimente une charge par 3 fils de phase et éventuellement le neutre.

1.1 - INTÉRÊT POUR LE FOURNISSEUR D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

La puissance est transportée sur 3 lignes au lieu d'une seule. Donc pour une même puissance de charge, le courant dans les lignes triphasées est 3 fois plus faible que dans une ligne monophasée : il y a moins de pertes Joule dans les lignes, la section des lignes peut être plus faible et la chute de tension est plus faible.

Le triphasé permet de transporter donc plus de puissance de façon plus efficace.

Ainsi un abonné EDF demandant plus de 18kVA sera automatiquement alimenté en triphasé.

1.2 - INTÉRÊT POUR LES MOTEURS ASYNCHRONES.

La puissance instantanée reçue par la charge est la somme des puissances transportées par chaque phase 1, 2 et 3 : $p(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t)$

La puissance active est la valeur moyenne de la puissance instantanée : $P = \langle p(t) \rangle$

En monophasé on montre que : $p(t) = P + UI \cos(2\omega t - \varphi)$: La puissance instantanée $p(t)$ reçue par la charge oscille autour de P , il y a une puissance fluctuante $p_f(t) = UI \cos(2\omega t - \varphi)$.

En triphasé on montre que : $p(t) = P$: La puissance reçue par une charge triphasée est constante.

On montre que si la puissance électrique reçue par un moteur est constante, alors le couple fourni par ce moteur est lui aussi constant.

Il n'y a donc pas de fluctuation du couple moteur, donc il n'y a pas d'oscillation mécanique.

Par ailleurs on sait aussi que les moteurs asynchrones monophasés n'ont pas de couple au démarrage : ils ne peuvent pas démarrer seuls. Pour les démarrer il faut utiliser un condensateur de démarrage.

2 - TENSIONS TRIPHASÉES ÉQUILIBRÉES.

On dit que 3 tensions (v_1, v_2, v_3) sont triphasées équilibrées si :

- elles sont sinusoïdales,
- de même fréquence f ,
- de même valeur efficace V
- déphasées du même angle entre elles.

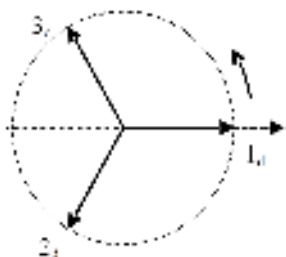
2.1 - SYSTÈMES DIRECT, INVERSE ET HOMOPOLAIRE.

On peut avoir des tensions, des courants, des charges triphasées.

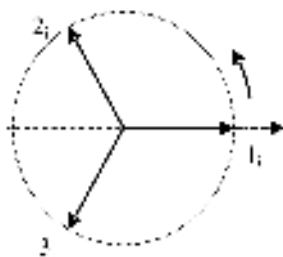
Elles forment un système direct si leur déphasage est de 120° et que l'ordre des phases est v_1, v_2, v_3 .

Elles forment un système indirect si leur déphasage est de 120° et que l'ordre des phases est v_1, v_3, v_2 .

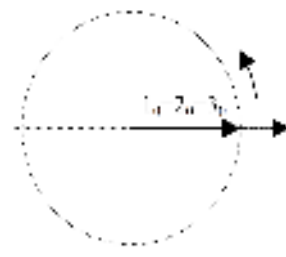
Elles forment un système homopolaire si elles ne sont pas déphasées.



système triphasé équilibré direct
 3 composantes retardées de 120°



système triphasé équilibré indirect
 3 composantes avancées de 120°



système homopolaire
 3 composantes identiques en phase

Si les tensions sont équilibrées directes, à tout instant on a $v_1(t) + v_2(t) + v_3(t) = 0$

L'ordre des phases est important car il détermine le sens de rotation d'un moteur triphasé.

Une charge triphasée équilibrée (impédance Z) est un système triphasé équilibré homopolaire.

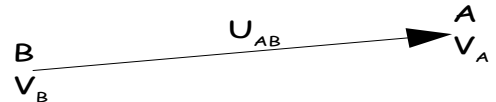


2.2 - TENSIONS SIMPLES / COMPOSÉES.

On appelle tension simple la tension entre une phase et le neutre. Pour les noter, on utilise la lettre « v » : v_{1N} , v_{2N} , v_{3N} .

On appelle tension composée la tension entre 2 phases. Pour les noter, on utilise la lettre « u » : exemple $u_{12} = v_{1N} - v_{2N}$.

Rappel : La tension $U_{AB} = V_A - V_B$ part de B pour aller vers A



Relation entre les valeurs efficaces des tensions simple V et composées U : $U = V\sqrt{3}$

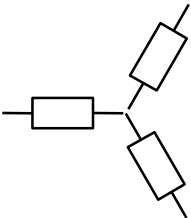
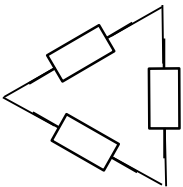
Un réseau triphasé de tension est donc caractérisé par 2 tensions efficaces : celle de la tension simple V et celle de la tension composée $U = V\sqrt{3}$.

Si on ne donne qu'une valeur de tension, c'est obligatoirement la tension composée efficace U .

3 -CHARGE LINÉAIRE TRIPHASÉE ÉQUILIBRÉE.

Une charge linéaire triphasée équilibrée est composée de 3 impédances identiques, couplées soit en étoile (Y), soit en triangle (D).

Couplage étoile		Couplage triangle	
Ph1		Ph1	
Ph2		Ph2	
Ph3		Ph3	
N		N	

En couplage étoile, il y a un point commun aux 3 impédances (point neutre) qu'on peut relier si on le souhaite au neutre de l'alimentation.

En couplage triangle, il n'y a que les 3 fils de phase qui alimentent la charge.

Dans les machines triphasées, les enroulements au niveau de la plaque à bornes sont inclinés pour que le couplage (Y ou D) ne se fasse qu'avec des connecteurs rectilignes.

3.1 - COMMENT CHOISIR LE COUPLAGE D'UNE CHARGE ?

Il faut relever sur la plaque signalétique de la charge la tension supportée par 1 enroulement V_{enr} (cette tension est la plus faible des 2 inscrites).

Cette tension doit correspondre soit à la tension simple V_{res} soit à la tension composée U_{res} délivrée par le réseau.

Si $V_{enr} = V_{res}$ alors la charge doit être couplée en étoile.

Si $V_{enr} = U_{res}$ alors la charge doit être couplée en triangle.



4 - COURANTS TRIPHASÉS ÉQUILIBRÉS.

En alimentant une charge linéaire équilibrée par un réseau de tensions équilibrées, les courants qui vont circuler seront eux aussi équilibrés, c'est à dire :

- sinusoïdaux de même fréquence f ,
- même valeur efficace I ,
- déphasage de 120° entre eux dans le même ordre que les tensions.

Sur chaque phase, il y a le même déphasage entre le courant et la tension.

4.1 - COURANT DE LIGNE, COURANT DE PHASE.

On appelle courant de ligne le courant circulant dans les lignes électriques (entre la source et la charge), on le note « i ».

On appelle courant de phase (ou d'enroulement) le courant circulant dans les enroulements de la charge, on le note « j ».

En couplage triangle, on a la relation $I = J\sqrt{3}$.

En couplage étoile, on a la relation $I = J$.

Quel que soit le couplage de la charge, le retard du courant de ligne i sur la tension simple v est l'angle φ du facteur de déplacement de la charge $DPF = \cos \varphi$.

En couplage triangle, φ est aussi le retard du courant de phase j sur la tension composée u .

4.2 - COURANT DANS LE FIL DE NEUTRE.

Le neutre de la charge n'est relié au neutre du réseau qu'en couplage étoile. On a alors :

$$i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = i_N(t) \text{ .}$$

Si les tensions sont triphasées équilibrées et si la charge est linéaire et équilibrée alors les courants seront eux aussi équilibrés donc $i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = 0$: il n'y a donc pas besoin de fil de neutre. (Si toutes les conditions sont respectées).



5 - PUISSANCES EN TRIPHASÉ ÉQUILIBRÉ.

D'après Boucherot, les puissances P et Q transportées sur les 3 phases est la somme des puissances sur chaque phase.

Si le réseau de tensions et si la charge sont équilibrés, les puissances P , Q et S triphasées représentent 3 fois les puissances sur un enroulement :

$$P = 3 \times P_{\text{enr}} \quad \text{où } P_{\text{enr}} \text{ représente la puissance appelée sur 1 enroulement.}$$

En notant :

- v_{enr} la tension aux bornes de l'enroulement,
- i_{enr} le courant dans l'enroulement
- $\varphi_{\text{enr}} = \varphi$ le déphasage entre i_{enr} et v_{enr}

$$\text{on a : } P_{\text{enr}} = V_{\text{enr}} \times I_{\text{enr}} \times \cos \varphi \quad \text{et donc } P = 3 \times V_{\text{enr}} \times I_{\text{enr}} \times \cos \varphi .$$

5.1 - EXPRESSION DES PUISSANCES AU NIVEAU DE LA CHARGE.

Comme expliqué précédemment :

$$P = 3 \times P_{\text{enr}} \quad \text{où } P_{\text{enr}} \text{ représente la puissance appelée sur 1 enroulement.}$$

$$P = 3 \times V_{\text{enr}} \times I_{\text{enr}} \times \cos \varphi , \quad Q = 3 \times V_{\text{enr}} \times I_{\text{enr}} \times \sin \varphi , \quad S = 3 \times V_{\text{enr}} \times I_{\text{enr}} , \quad \text{fp} = \cos \varphi$$

On utilise rarement ces relations pour un bilan de puissance.

On l'utilise pour dimensionner les protections d'un transformateur triphasé.

5.2 - EXPRESSION DES PUISSANCES SUR LES LIGNES.

Le réseau de tension est équilibré. La charge est équilibrée, donc les courants sont équilibrés.

En couplage étoile :

- $v_{\text{enr}} = v$ la tension aux bornes de l'enroulement,
- $i_{\text{enr}} = i$ le courant dans l'enroulement
- $\varphi_{\text{enr}} = \varphi$ est le retard de i sur v

$$\text{donc } P = 3 \times V \times I \times \cos \varphi \quad \text{avec } U = V \sqrt{3} \quad \text{on arrive à } P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$$

En couplage triangle :

- $v_{\text{enr}} = u$ la tension aux bornes de l'enroulement,



- $i_{\text{enr}} = j$ le courant dans l'enroulement
 - $\varphi_{\text{enr}} = \varphi$ est le retard de j sur u et aussi celui de i sur v
- donc $P = 3 \times U \times J \times \cos \varphi$ avec $J = I / \sqrt{3}$ on arrive à $P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$

Expression des puissances en triphasé équilibré :

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi \quad Q = \sqrt{3} \times U \times I \times \sin \varphi \quad S = \sqrt{3} \times U \times I \quad \text{fp} = \cos \varphi$$

Ce sont ces expressions que l'on va principalement utiliser pour faire le bilan de puissance d'une installation triphasés.

Ces expressions sont intéressantes car elles sont valables quel que soit le couplage :

- U tension entre phases, I courant de ligne – grandeurs toujours disponibles
- $\cos \varphi$ « facteur de puissance » de la charge – donc propre à la charge

5.3 - PERTES JOULES EN TRIPHASÉ.

Les pertes Joule d'un enroulement de résistance R qui est traversé par un courant

$$I_{\text{enr}} \text{ ont pour expression } P_{J_{\text{enr}}} = R I_{\text{enr}}^2 .$$

$$\text{En triphasé équilibré } P_J = 3 R I_{\text{enr}}^2 .$$

En couplage étoile la mesure entre 2 phases de la résistance donne

$$R_{12} = 2R \Rightarrow R = \frac{R_{12}}{2} .$$

$$\text{Les pertes Joule sont donc } P_J = 3 R I_{\text{enr}}^2 = 3 R I^2 = 3 \frac{R_{12}}{2} I^2 .$$

En couplage triangle la mesure entre 2 phases de la résistance donne

$$R_{12} = \frac{R \times 2R}{R + 2R} = 2R/3 \Rightarrow R = \frac{3 R_{12}}{2} .$$

$$\text{Les pertes Joule sont donc } P_J = 3 R I_{\text{enr}}^2 = 3 R J^2 = 3 \frac{3R_{12}}{2} (I/\sqrt{3})^2 = 3 \frac{R_{12}}{2} I^2 .$$

Quel que soit le couplage d'une charge triphasée équilibrée, en mesurant la résistance R_{12} entre 2 phases

d'une charge et le courant de ligne I , on sait que les pertes Joule seront $P_J = \frac{3}{2} R_{12} I^2$.



5.4 - COMPENSATION DE PUISSANCE RÉACTIVE.

Le problème, et les solutions sont les mêmes qu'en monophasé.

Le changement c'est qu'il y a maintenant 3 éléments pour le compensateur et que ces éléments peuvent être couplés en étoile ou en triangle.

Il faudra donc identifier la tension aux bornes d'un élément du compensateur.

La relation magique reste valable : $Q_Q = P_{ch} \times (\tan \varphi_{EDF} - \tan \varphi_{ch})$.

- Si $Q_Q < 0$ alors il faudra fournir de la puissance réactive avec des condensateurs : $Q_Q = -3 \times C \omega U_C^2$
 - U_C est la tension aux bornes d'un condensateur, elle dépend du couplage des condensateurs
- Si $Q_Q > 0$ alors il faudra consommer de la puissance réactive avec des inductances : $Q_Q = +3 \times U_L^2 / (L \omega)$ (U_L tension aux bornes d'une bobine)

6 - BRANCHEMENTS D'UN WATTMÈTRE.

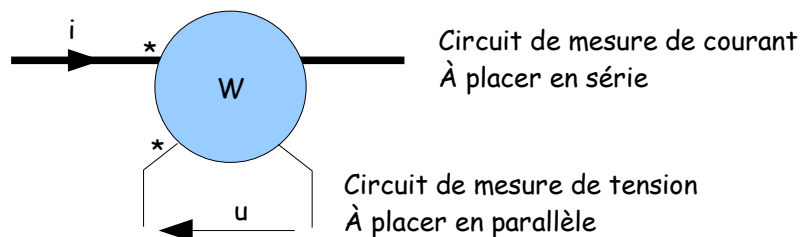
Un wattmètre comporte un capteur de courant ($i(t)$) et un capteur de tension ($u(t)$).

L'appareil « calcule » la puissance instantanée $p(t)=u(t)\times i(t)$, puis calcule la valeur moyenne $P_{mes}=\langle p(t)\rangle=\frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt$.

6.1 - REPRÉSENTATION D'UN WATTMÈTRE MONOPHASÉ SUR UN SCHÉMA.

Le capteur courant est à placer en série, et le capteur de tension est à placer en parallèle.

Les bornes repérées par « * » indique le sens de courant et de tension pour mesurer la puissance reçue (« bornes + »).



$$P_{mes}=\langle u(t)\times i(t)\rangle$$

figure 1: Représentation d'un wattmètre monophasé

6.2 - MESURES AVEC UN WATTMÈTRE TRIPHASÉ.

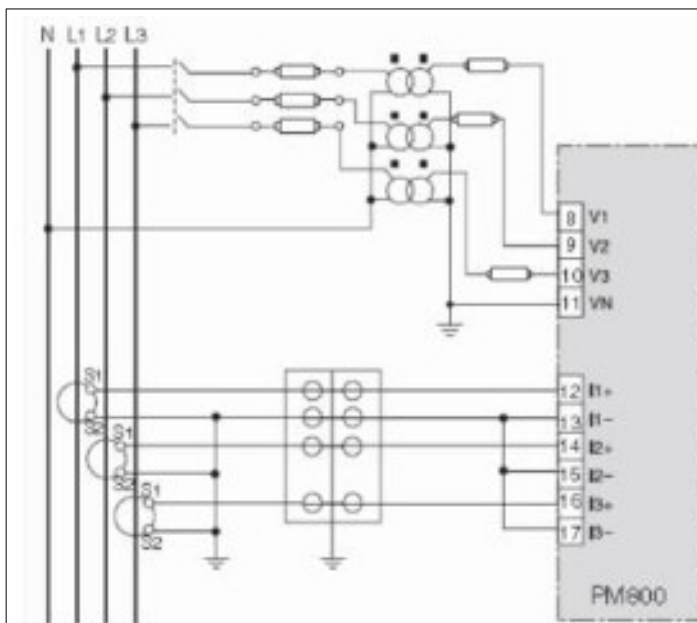


figure 2: Branchement d'une centrale Schneider PM800 réseau 4 fils 3P+N

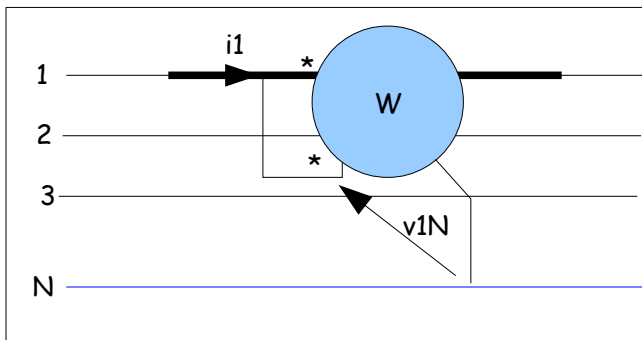
Les wattmètres triphasés mesurent les puissances sur chaque phase : ils mesurent les 3 courants de ligne et les 3 tensions simples.

Certains mesurent aussi le courant de neutre.

Pour les fortes puissances, les courants sont mesurés avec des transformateurs de courant (TC) et les tensions avec des transformateurs de tension (TT).

6.3 - MESURE DES PUISSANCES TRIPHASÉES AVEC UN WATTMÈTRE MONOPHASÉ.

6.3.1 - RÉSEAU 3P+N .



$$P_{mes} = \langle v_{1N} \times i_1 \rangle = V_1 I_1 \cos \varphi_1$$

L'appareil mesure en fait P_1 .

Pour calculer Q, il déphase le courant de 90° (transformation cos en sinus).

Si la charge et le réseau sont équilibrés, il suffit de mesurer la puissance sur une phase et multiplier par 3.

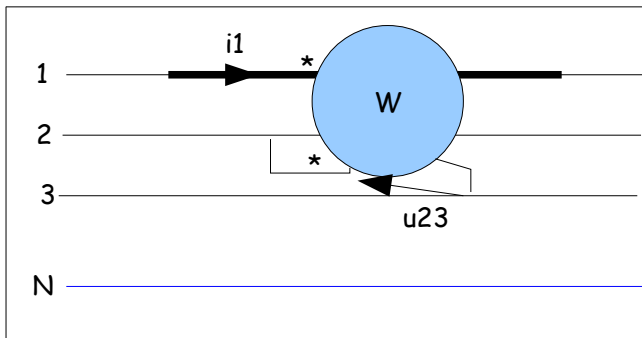
Si la charge et le réseau ne sont pas équilibrés, il faut mesurer la puissance sur chaque phase.

6.3.2 - RÉSEAU 3P - CHARGE ÉQUILIBRÉE.

Ce branchement est celui proposé par les analyseurs de puissance Chauvin Arnoux CA82XX.

La mesure est correcte si la charge est équilibrée et le réseau de tension équilibré.

Les courants sont alors équilibrés : φ est le retard du courant de ligne sur la tension simple correspondante.



$$P_{mes} = \langle u_{23} \times i_1 \rangle = U_{23} I_1 \cos(\varphi - 90^\circ) = U I \sin \varphi ,$$

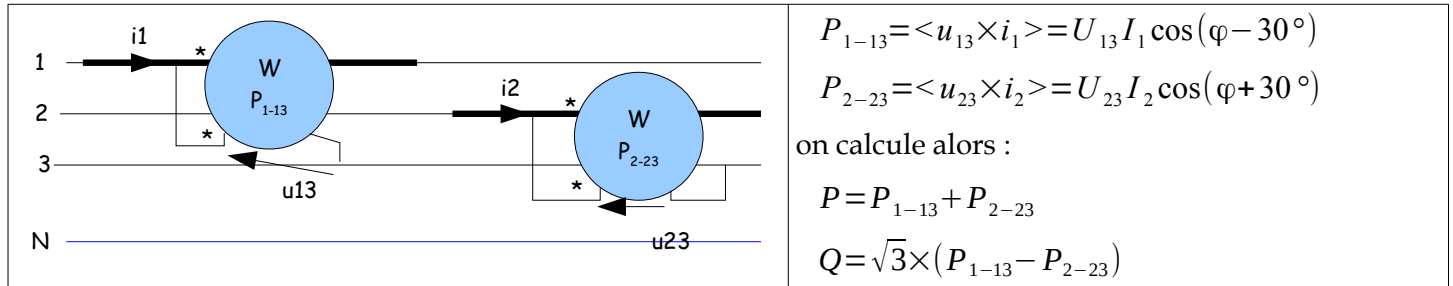
L'appareil mesure en fait la puissance réactive $Q/\sqrt{3}$.

En déphasant le courant de 90° , il transforme Q en P.

6.3.3 - RÉSEAU 3P - CHARGE DÉSÉQUILIBRÉE - MÉTHODE DES 2 WATTMÈTRES.

La méthode des 2 wattmètres mesure correctement P si $i_1 + i_2 + i_3 = 0$: La charge peut être déséquilibrée mais il ne faut pas de fil de neutre.

La méthode des 2 wattmètres mesure correctement Q si les tensions et la charge sont équilibrées.



Calcul de P :

$$\begin{aligned} P_{1-13} + P_{2-23} &= \langle u_{13} \times i_1 \rangle + \langle u_{23} \times i_2 \rangle \\ &= \langle (v_1 - v_3) \times i_1 \rangle + \langle (v_2 - v_3) \times i_2 \rangle \\ &= \langle v_1 \times i_1 \rangle + \langle v_2 \times i_2 \rangle + \langle v_3 \times (-i_1 - i_2) \rangle \end{aligned}$$

si $i_1 + i_2 + i_3 = 0 \Rightarrow i_3 = -i_1 - i_2$

alors $P_{1-13} + P_{2-23} = \langle v_1 \times i_1 \rangle + \langle v_2 \times i_2 \rangle + \langle v_3 \times i_3 \rangle = P_1 + P_2 + P_3 = P$

La mesure de P est possible à conditions que **les courants soient équilibrés** ou qu'il n'y ait pas de neutre.

Calcul de Q :

Il faut que la **charge et les tensions soient équilibrés** : les courants seront alors équilibrés et **l'angle φ sera le même pour toute les phases.**

on utilise $\cos(a-b) = \cos a \cos b + \sin a \sin b$

$$\Rightarrow P_{1-13} = \langle u_{13} \times i_1 \rangle = U_{13} I_1 \cos(\varphi - 30^\circ) = U_{13} I_1 (\cos \theta \cos \varphi + \sin \theta \sin \varphi)$$

et $\cos(a+b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b$

$$\Rightarrow P_{2-23} = \langle u_{23} \times i_2 \rangle = U_{23} I_2 \cos(\varphi + 30^\circ) = U_{23} I_2 (\cos \theta \cos \varphi - \sin \theta \sin \varphi)$$

si les tensions sont équilibrées : $U_{13} = U_{23} = U$

et si les courants sont équilibrés $I_1 = I_2 = I$

du coup $P_{1-13} - P_{2-23} = 2 U I (\sin \theta \times \sin 30^\circ) = 2 U I \sin \theta \times \frac{1}{2} = U I \sin \theta$

7 - MESURE DES TENSIONS, COURANTS ET PUISSANCES.



Un appareil numérique numérise le courant et la tension : sur une période il enregistre N échantillons du courant et de la tension.

7.1 - LA MESURE DE LA TENSION.

Pour les tensions BT < 1000V, la mesure se fait comme sur tous les multimètres.

Pour les tensions plus importantes, on utilise un transformateur de tension (TT).

Le TT permet de ramener la tension à mesurer à des valeurs mesurables par l'appareil.

Le secondaire du transformateur est à vide.

Avec un TT, on ne peut que mesurer l'ondulation de la tension (VAC ou VRMS). On ne pourra pas mesurer sa valeur moyenne.

Définition et calcul de la tension efficace :
$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v^2(k)}$$

7.2 - LA MESURE DU COURANT.

Dans un multimètre « classique », le courant est mesuré en plaçant l'appareil de mesure en série avec la charge.

Le courant à mesurer est transformé en tension grâce à une résistance de charge (« shunt »).

L'appareil de mesure mesure la tension aux bornes de la résistance.

Les appareils « modernes » utilisent des pinces de courant. Les pinces sont plus faciles d'utilisation puisqu'on peut facilement les déplacer.

Il y a 2 types de pince de courant : les transformateurs de courant (TC) et les capteurs à effet Hall.

- Les transformateurs de courant (TC) ont leur secondaire chargé par une résistance R.
Le courant secondaire est l'image du courant primaire à mesurer. On mesure la tension aux bornes de la résistance R.
Un TC ne peut mesurer que l'ondulation du courant (IAC ou IRMS). On ne pourra pas mesurer sa valeur moyenne.
C'est ce type de capteur qui est utilisé avec le CA82XX.
- Les capteurs à effet Hall mesurent la « tension de Hall » causée par le champ magnétique créé par le courant à mesurer sur un capteur semi conducteur.
Les capteurs à effet Hall peuvent mesurer la valeur moyenne du courant, mais nécessitent un réglage du zéro.



Il doivent être alimentés par une source externe.

Les sondes de courant pour oscilloscope sont des capteurs à effet Hall.

Définition et calcul de la valeur efficace $I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i^2(k)}$

7.3 - LA MESURE DES PUISSANCES.

- La puissance instantanée est le produit de la tension par le courant. La puissance active est la valeur moyenne de la puissance instantanée.

Le calcul de la puissance active P se fait en faisant la moyenne du produit des échantillons de tension et de courant.

$$P = \langle v(t) \times i(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \times i(t) dt = \frac{\sum_{k=1}^N v(k) \times i(k)}{N} .$$

- La puissance apparente est le produit des valeurs efficaces de la tension et du courant :

$$S = V_{RMS} \times I_{RMS} .$$

- La puissance active dépend du $\cos \varphi$, la puissance réactive dépend de $\sin \varphi$.

On sait que $\sin \varphi = \cos(\varphi - \pi/2)$: Le passage de $\cos \varphi$ à $\sin \varphi$ est obtenu en déphasant de $\pi/2$ le courant par rapport à la tension, soit T/4 ou N/4 échantillons.

$$QD = \frac{\sum_{k=1}^N v(k) \times i(k - N/4)}{N} .$$

La valeur mesurée QD ne tient pas compte des harmoniques, elle mesure ensemble la puissance réactive Q et la puissance déformante D : $S_{\sinus}^2 = P^2 + QD^2$.

- Les wattmètres qui tiennent compte des harmoniques (« analyseur de puissance ») mesurent la « vraie » puissance réactive à partir du fondamental de la tension v_f et du courant i_f (ils filtrent la tension et le courant avant de faire le calcul) :

$$Q = \frac{\sum_{k=1}^N v_f(k) \times i_f(k - N/4)}{N} ; \quad S_{\text{harmonic}}^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

- le facteur de puissance est mesuré par le rapport $Fp = P/S$.
- le facteur de déplacement est mesuré par le rapport $DPF = P/\sqrt{P^2 + Q^2}$