

- PUISSANCES -

1 -La question que l'on se pose.....	2
2 -Définition générale des puissances électriques.....	2
3 -Régime sinusoïdal.....	3
3.1 -Expression des tension et courant.....	3
3.2 -Expression de la puissance active.....	3
3.3 -Puissances à prendre en compte.....	4
3.4 -Interprétation des mesures.....	4
3.5 -Choix des appareils de mesure.....	4
4 -Tension sinusoïdale, courant périodique.....	5
4.1 -Expression des tension et courant.....	5
4.2 -Expression de la puissance active.....	5
4.3 -Puissances à prendre en compte.....	6
4.4 -Interprétation des mesures.....	7
4.5 -Choix des appareils de mesure.....	7
5 -Tension et courant périodiques.....	9
5.1 -Expression des tensions et courant.....	9
5.2 -Expression des puissances.....	9
5.3 -Puissances à prendre en compte.....	9
5.4 -Interprétation des mesures.....	10
5.5 -Choix des appareils de mesure.....	11



1 - LA QUESTION QUE L'ON SE POSE.

On vous demande toujours de faire un diagnostic sur une installation électrique.

Pour impressionner votre chef de service, vous avez troqué le multimètre pour un analyseur de puissance.

Vous avez analysé le courant et la tension - « super » vous dit votre chef « mais nous on paye des kW.h et des kVA ! . Alors à quoi ça sert ton appareil ? »

2 - DÉFINITION GÉNÉRALE DES PUISSANCES ÉLECTRIQUES.

On note $u(t)$ la tension et $i(t)$ le courant d'une *charge monophasée orientée en convention récepteur*. Ces signaux sont périodiques de période T .

On note U_{AC+DC} et I_{AC+DC} les valeurs efficaces de la tension et du courant.

On définit la puissance instantanée $p(t)$:

$$p(t) = u(t) \times i(t) .$$

On appelle puissance active la valeur moyenne de la puissance instantanée :

$$P = \langle p(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt \quad (\text{W})$$

La puissance active est la puissance électrique qui se transforme effectivement en une autre puissance (mécanique, thermique, lumineuse ...)

On définit la puissance apparente S :

$$S = U_{AC+DC} \times I_{AC+DC} \quad (\text{VA})$$

L'écart entre les puissances active et apparente est mesuré par le facteur de puissance :

$$Fp = P/S$$

3 - RÉGIME SINUSOÏDAL.

Dans ce régime, la tension et le courant sont sinusoïdaux de même fréquence.

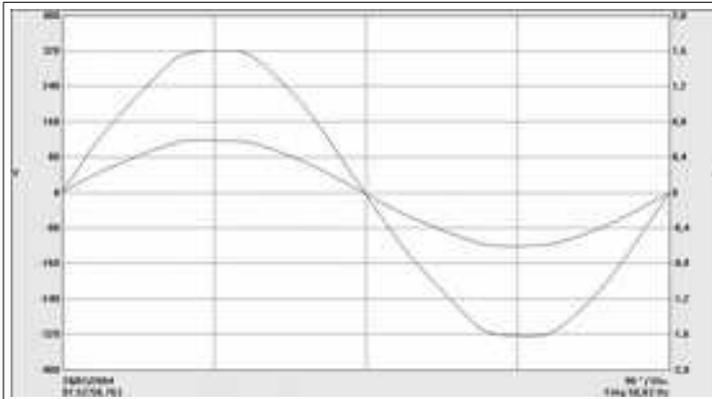


figure 1: chronogrammes v et i sinus



figure 2: spectre de puissance v et i sinus

C'est le cas de circuits constitués des dipôles linéaires R, L ou C alimentés par une source sinusoïdale.

C'est le cas aussi des MAS, MS et transformateur alimentés par le réseau lorsqu'ils sont en charge.

Ce n'est pas forcément le cas lorsque ces machines sont à vide : le courant appelé est alors le courant de magnétisation qui est déformé (présence de quelques harmoniques rang 3, 5, 7 - TDH_i > 10%).

3.1 - EXPRESSION DES TENSION ET COURANT.

On choisit de prendre la tension comme référence de phase :

$$u(t) = U \sqrt{2} \sin \omega t$$

On choisit de prendre le courant en retard sur la tension :

$$i(t) = I \sqrt{2} \sin(\omega t - \phi)$$

3.2 - EXPRESSION DE LA PUISSANCE ACTIVE.

La puissance instantanée reçue par le dipôle est :

$$p(t) = u(t) \times i(t) = 2U I \sin(\omega t) \sin(\omega t - \phi)$$

On sait que $2 \sin(\omega t) \times \sin(\omega t - \phi) = \cos(\omega t - (\omega t - \phi)) - \cos(\omega t + (\omega t - \phi))$

donc $p(t) = UI (\cos \phi + \cos(2\omega t - \phi))$

La puissance instantanée est composée de 2 termes :



- un terme constant : $UI \cos \phi$
- un terme en cosinus : $UI \cos(2\omega t - \phi)$ \Leftrightarrow « puissance fluctuante » .

La puissance active est la valeur moyenne de la puissance instantanée.

La puissance fluctuante étant un cosinus, sa valeur moyenne est nulle.

La puissance active est donc $P = UI \cos \phi$

3.3 - PUISSANCES À PRENDRE EN COMPTE.

En régime sinusoïdal on a les expressions suivantes :

- puissance active $P = UI \cos \phi$
- puissance apparente : $S = UI$
- facteur de puissance : $Fp = \cos \phi$

On définit la puissance réactive faisant le lien entre P et S : $S^2 = P^2 + Q^2$

- donc $Q = UI \sin \phi$ (en VAR)

3.4 - INTERPRÉTATION DES MESURES.

La puissance réactive et le $\cos \Phi$ sont dus au déphasage entre le courant et la tension.

La tension efficace mesurée est celle du réseau.

Le courant efficace mesuré permet de dimensionner les protections et la section des conducteurs.

La puissance active est transportée par le 50Hz (figure 2).

Le mauvais facteur de puissance (dû à Q) surcharge les lignes et surdimensionne les protections.

La consommation de Q entraîne un abonnement (en VA) plus cher, et une facturation supplémentaire.

Le client a tout intérêt à compenser la puissance réactive.

3.5 - CHOIX DES APPAREILS DE MESURE.

Les tensions et courant sont sinusoïdaux de fréquence 50Hz - ils n'ont pas de composante continue

=> multimètre « classique » type RMS suffit - bande passante au dessus de 50Hz.

Pour les puissances, un wattmètre « classique » suffit - bande passante au dessus de

50Hz.

4 - TENSION SINUSOÏDALE, COURANT PÉRIODIQUE.

C'est le cas d'un réseau non pollué (tension sinusoïdale) alimentant une charge non linéaire (courant non sinusoïdal).

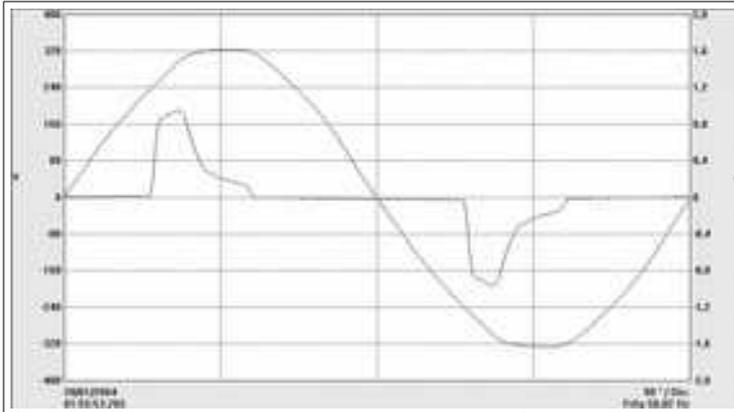


figure 3: chronogrammes v sinus et i périodique - réseau non pollué



figure 4: spectre des puissances v sinus et i périodique - réseau non pollué

4.1 - EXPRESSION DES TENSION ET COURANT.

La tension est sinusoïdale : $v(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t)$.

Le courant est périodique, alternatif mais non sinusoïdal, donc composé d'harmoniques :

$$i(t) = \sum_{n \geq 1} I_n \sqrt{2} \sin(n\omega t + \phi_n) .$$

On doit être capable de mesurer la valeur efficace du courant et celle de ses harmoniques.

4.2 - EXPRESSION DE LA PUISSANCE ACTIVE.

On suppose que les harmoniques de courant n'ont pas réussi à polluer le réseau, il n'y a donc pas d'harmonique de tension.

Recherchons l'expression de la puissance instantanée $p(t)$:

$$p(t) = v(t) \times \sum_{n \geq 1} [I_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \phi_n)] = \sum_{n \geq 1} [V \sqrt{2} \sin(\omega t) \times I_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \phi_n)]$$

$$p(t) = \sum_{n \geq 1} [2V I_n \sin(\omega t) \times \sin(n\omega t - \phi_n)]$$

on sait que $2\sin(\omega t) \times \sin(n\omega t - \phi) = \cos((1-n)\omega t + \phi) - \cos((1+n)\omega t - \phi)$

$$\text{donc } p(t) = \sum_{n \geq 1} V I_n [\cos((1-n)\omega t + \phi_n) - \cos((1+n)\omega t - \phi_n)]$$



On va distinguer le cas $n=1$ des autres cas $n \geq 2$:

$$p(t) = V I_1 \left[\cos((1-1)\omega t + \phi_1) - \cos((1+1)\omega t - \phi_1) \right] + \sum_{n \geq 2} V I_n \left[\cos((1-n)\omega t + \phi_n) - \cos((1+n)\omega t - \phi_n) \right]$$

$$p(t) = V I_1 \cos \phi_1 - V I_1 \cos((2)\omega t - \phi_1) + \sum_{n \geq 2} V I_n \left[\cos((1-n)\omega t + \phi_n) - \cos((1+n)\omega t - \phi_n) \right]$$

Il y a un seul terme constant (dû au fondamental du courant uniquement), tous les autres sont des $\cos n \omega t$, donc de valeur moyenne nulle.

4.3 - PUISSANCES À PRENDRE EN COMPTE.

Dans le cas tension sinusoïdale et courant périodique on a les expressions suivantes :

➤ Puissance active : $P = V \times I_1 \cos(\phi_1)$

La puissance active est transportée uniquement par le fondamental du courant : elle dépend de :

V : valeur efficace de la tension

I_1 : valeur efficace du fondamental du courant

ϕ_1 : retard du fondamental du courant sur la tension.

➤ Puissance apparente : $S = V \times I_{AC+DC}$

La puissance apparente dépend des valeurs efficaces de la tension et du courant.

➤ Puissance réactive : $Q = V \times I_1 \sin(\phi_1)$

➤ facteur de déplacement $DPF = \cos(\phi_1)$

On a $P^2 + Q^2 = (V \times I_1)^2 \neq S^2 = (V \times I)^2$ car $I_1 < I$

➤ on calcule la puissance déformante D (en VA) : $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$

La puissance déformante est due aux harmoniques du courant.

➤ Facteur de puissance : $Fp = P/S \neq DPF = \cos(\phi_1)$

Le facteur de puissance FP et le facteur de déplacement (DPF ou cos phi) ne sont pas égaux lorsqu'il y a des harmoniques.



4.4 - INTERPRÉTATION DES MESURES.

La puissance réactive et le DPF sont dus au retard du fondamental du courant sur la tension.

La mauvaise valeur du facteur de puissance s'explique par :

le déphasage du fondamental du courant sur la tension (Q - DPF)

la présence d'harmoniques de courant (puissance D)

La tension efficace mesurée est celle du réseau.

Le courant efficace mesuré permet de dimensionner les protections et la section des conducteurs.

Le mauvais facteur de puissance (dû à Q) surcharge les lignes et surdimensionne les protections.

La consommation de Q entraîne un abonnement (en VA) plus cher, et une facturation supplémentaire.

La présence d'harmoniques de courant surcharge encore plus les lignes (car $I > I_{\text{fondamental}}$) et sur-dimensionne les protections sur les phases.

Il sur-dimensionne en plus le conducteur de neutre car il y a addition des harmoniques de courant de rang $3 \cdot k$ dans le neutre ($I_N = 3 \times I_{\text{rang } 3}$).

Le neutre étant parcouru par un courant 150Hz, il doit être aussi protégé.

Les harmoniques de courant surchargent les condensateurs de relèvement de DPF présents par ailleurs, et accélèrent leur usure. Les condensateurs doivent être choisis pour supporter une tension bien supérieure à V_{res} .

La puissance active est transportée uniquement par le fondamental 50Hz (figure 4) - il n'y a pas de pertes supplémentaires pour la charge.

Dans la majorité des cas des charges électroniques (variateurs de vitesse, alimentation à découpage) la puissance réactive Q est < 0 : ils produisent un peu de réactif à cause des condensateurs de lissage en sortie du redresseur de tête

Pour les charges électroniques, le mauvais facteur de puissance est donc dû principalement à D.



Les harmoniques de courant, en circulant dans les inductances de lignes, créent des harmoniques de tension : la tension est alors déformée (d'où le terme puissance « déformante ») ou « polluée » (pollution harmonique).

La norme CEI 61000 fixe le TDH_u supportable par les appareils, le fournisseur d'électricité garantit un TDH_u à la livraison.

La tension est polluée sur tout le réseau BT (en sortie du transformateur).

Le pollueur est la première victime des harmoniques de courant qu'il appelle.

C'est à lui de les compenser avant qu'elles ne polluent trop le réseau (déformation de la tension - augmentation du TDH_u au delà de la norme CEI 61000).

4.5 - CHOIX DES APPAREILS DE MESURE.

Le courant est alternatif périodique 50Hz. Ces harmoniques HF sont négligeables : on peut négliger les harmoniques de courant au delà du rang 50.

Il faut des appareils avec une bande passante d'au moins [50Hz ; 50*50Hz] (c'est le cas des analyseurs de puissance).

Pour faire une analyse rigoureuse des puissances, il faut un appareil capable de faire la distinction entre le F_p et le DPF (capable de distinguer Q et D) : on les appelle des « analyseurs de puissance » (CA8220 par exemple).

Un wattmètre « classique » mais avec une bande passante suffisante [50Hz; 2500Hz] mesurera correctement P, S et F_p mais ne fera pas la différence entre Q et D, F_p et DPF.

S'il n'a pas la bonne bande passante, les mesures seront fausses.

5 - TENSION ET COURANT PÉRIODIQUES.

C'est la cas en sortie d'un onduleur : la tension et le courant sont périodiques alternatifs.

C'est aussi le cas en sortie d'un pont redresseur ou d'un hacheur : la tension et le courant ont une composante continue mais aussi des harmoniques.

C'est enfin le cas sur un réseau électrique pollué : les charges non linéaires appellent un courant périodique tellement fort que la tension réseau n'est plus sinusoïdale (figure 5).

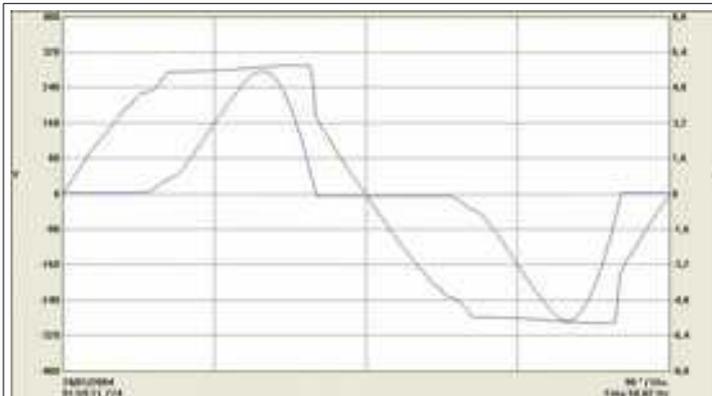


figure 5: chronogrammes v et i périodiques - réseau pollué



figure 6: spectre des puissances v et i périodiques - réseau pollué

5.1 - EXPRESSION DES TENSIONS ET COURANT.

La tension est composée d'harmoniques : $v(t) = V_{DC} + \sum_{k \geq 1} V_k \sqrt{2} \sin(k \omega t + \phi_{u-k})$

Le courant est composé d'harmoniques : $i(t) = I_{DC} + \sum_{n \geq 1} I_n \sqrt{2} \sin(n \omega t + \phi_{i-n})$.

On doit être capable de mesurer la valeur efficace de la tension et du courant et la valeur efficace de leurs harmoniques.

5.2 - EXPRESSION DES PUISSANCES.

Dans le cas précédent, la tension était sinusoïdale ($k=1$) et on distinguait le cas $n=1=k$ des cas $n \geq 2$.

On trouvait une puissance active due uniquement au fondamental $n=1$.

Dans notre cas on doit distinguer les cas $n=k$ des cas $n \neq k$.

On va trouver une puissance active sur tous les rangs n d'harmoniques.

5.3 - PUISSANCES À PRENDRE EN COMPTE.

On a donc : $P = V_{DC} \times I_{DC} + P_1 + P_2 + P_3 + \dots = V_{DC} \times I_{DC} + \sum_{n \geq 1} P_n$



avec $P_n = V_n \times I_n \cos(\varphi_n)$

V_n : valeur efficace de l'harmonique de rang n de la tension

I_n : valeur efficace de l'harmonique de rang n du courant

φ_n : retard de l'harmonique de rang n du courant par rapport à l'harmonique de rang n de la tension.

La puissance apparente a pour expression : $S = V_{AC+DC} \times I_{AC+DC}$.

Le facteur de puissance est $Fp = P/S$.

On ne distingue plus les puissances réactive et déformante : $S^2 = P^2 + (Q^2 + D^2)$.

On ne parle plus de facteur de déplacement.

5.4 - INTERPRÉTATION DES MESURES.

Dans le cas v et i périodique, chaque harmonique transporte de la puissance active (voir figure 6).

Chaque harmonique de puissance active électrique va être transformé par la charge en une autre puissance (voir §2).

Or la seule puissance active dont a besoin la charge est transportée :

- par le continu pour une charge continue,
- par le 50Hz pour les charges monophasées/triphasées.

Tous les autres harmoniques de puissance ne sont que des pertes supplémentaires pour la charge entraînant une élévation de sa température et/ou des vibrations mécaniques supplémentaires (en particulier apparition de « bruit magnétique » dans les machines).

Dans le cas de la figure 6, on s'aperçoit que le rang 3 transporte une puissance < 0 : la charge produit de la puissance électrique (??)

La tension efficace mesurée n'est plus celle du réseau (sinusoïdale) : $V_{AC+DC} > V_{res}$ mais $V_1 < V_{res}$ (chute de la tension fondamentale). Les charges fonctionneront moins bien à cause de la chute de tension fondamentale.

Les harmoniques de courant surchargent les conducteurs de phase et de neutre et surdimensionnent les protections phase et neutre.

Les condensateurs de compensation de Q sont encore plus surchargés, donc doivent



être encore plus sur-dimensionnés en tension.

Encore une fois sur un réseau électrique, le client est la première victime des harmoniques de courant qu'il appelle. Et là la situation est catastrophique : tous les appareils de son installation ne sont plus alimentés correctement : la tension est trop faible, les appareils chauffent plus, les moteurs font du bruit, ils vibrent, les condensateurs sont surchargés ..

Il lui faut absolument compenser les harmoniques de courant afin de ramener le TDH_u dans la norme CEI 61000.

Par ailleurs, dans le cas de l'alimentation des machines par variateur de vitesse, on comprend que l'utilisation du variateur de vitesse va obligatoirement augmenter les pertes de la machine, donc baisser le rendement global {variateur + machine} à cause des supplémentaires de la machine et des pertes du variateur.

Le variateur de vitesse supprime les problèmes dues aux démarrages directs, permet de réduire la consommation si on fait fonctionner la machine à différentes vitesses, mais pour un fonctionnement à vitesse fixe, il entraînera un sur-coup de consommation.

Il faut donc choisir un moteur à haut rendement.

Le rendement énergétique d'un moteur est l'inscription « IE ». Depuis Janvier 2015, on ne trouve que des moteurs de classe min IE2. En fonction de la puissance, et de l'utilisation d'un variateur, la norme CEI 60034 impose la classe du moteur.

Enfin il faut que l'utilisateur puisse modifier dans les réglages du variateur les fréquences de commutation (fréquence de hachage ou de découpage MLI) afin de limiter le bruit « magnétique » et les vibrations dues à d'éventuelles fréquences de résonance.

Les fréquences de hachage et de découpage sont calculées pour limiter les pertes supplémentaires dans le moteur, mais ne permettent pas de les éliminer complètement.

5.5 - CHOIX DES APPAREILS DE MESURE.

Il faut obligatoirement utiliser un analyseur de puissance.

Cet analyseur doit être capable de voir les harmoniques de puissance, car la seule puissance utile est transportée soit par le continu (Mcc), soit par le 50Hz (Mcs).

Pour une analyse sur un réseau électrique 50Hz, on s'aperçoit que les harmoniques au delà du rang 50 sont négligeables.

Il nous faut donc un analyseur de puissance capable de voir les harmoniques de puissances et de bande passante d'au moins [50Hz;50*50Hz].



En sortie d'un variateur pour Mcc à thyristors (pont redresseur commandé), les harmoniques de tension et courant sont de fréquence très basse (100Hz pour le monophasé, 300Hz pour le triphasé).

Il faut un analyseur capable de voir le continu (sonde à effet Hall pour le courant) et d'aller jusqu'au rang 50 : bande passante [0 ; 50*50Hz].

En sortie d'un variateur pour Mcc à transistors (hacheur), la fréquence de hachage est de l'ordre du kHz (pour limiter l'ondulation du courant dans la Mcc).

Il faudrait un analyseur capable de voir le continu (sonde à effet Hall pour le courant) et d'aller jusqu'à 20kHz : bande passante [0 ; 20kHz].

En sortie d'un variateur pour Mcs, la fréquence de découpage MLI est en général de 3kHz (pour limiter les harmoniques de courant dans la Mcs).

La fréquence du fondamental règle la vitesse de la Mcs.

Il faudrait un analyseur capable de voir le fondamental (simple transformateur de courant) et d'aller jusqu'à 20kHz : bande passante]0 ; 20kHz].