

Lettre info n° 22

Définition de la mesure des puissances selon les normes – DIN 40110-2 et IEEE 1459

Il existe actuellement sur le marché une large gamme d'appareils électroniques conçus pour mesurer numériquement les puissances électriques. Une comparaison parmi les offres des différents constructeurs révèle des divergences de résultats de mesure, notamment lors de la mesure de la puissance réactive, en présence d'une onde sinusoïdale déformée ou d'un réseau triphasé en régime déséquilibré.

Une mesure erronée peut fausser la conception et l'exploitation des installations électriques et engendrer des surcharges et des dysfonctionnements.

La mesure des puissances en réseau polyphasé est définie dans les normes DIN 40110-2 (Allemagne) et IEEE 1459 (International). Ces principes fondamentaux alimentent les bases de calcul de puissance des appareils de mesure performants.

Tous les produits A. Eberle appliquent les méthodes de calcul dictées par la norme DIN 40110-2.

Dans la suite de ce document, les définitions de base des puissances active, réactive et apparente seront dans un premier temps décrites, puis illustrées à l'aide d'exemples relatifs aux différents constituants de la puissance réactive.

Les mesures de puissances seront différenciées selon le système: monophasé ou polyphasé, et selon le type de circuit: étoile ou triangle.

Définition des puissances

La puissance active est la seule puissance directement quantifiable à partir des valeurs instantanées de la tension $u(t)$ et du courant $i(t)$. La puissance instantanée $p(t)$ est calculée, pour chaque échantillon, par le produit de la tension et du courant.

$$p(t) = u(t) * i(t) \quad (1)$$

L'intégration de la puissance instantanée $p(t)$ sur un intervalle temporel $T = t_2 - t_1$ quantifie l'énergie totale E . La période temporelle T est librement ajustable, à une demipériode de la fréquence fondamentale (perturbographie) ou à 10 minutes (comptage), par exemple.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad (2)$$

La part d'énergie qui est transportée d'une source vers une charge puis absorbée par cette dernière (p.ex. lampe, moteur) correspond à l'énergie active. La part non active est nommée énergie réactive. Elle apparaît en présence d'éléments réactifs, par exemple inductifs, tels les circuits magnétiques des moteurs et des transformateurs, ou capacitifs, comme les systèmes de compensation (condensateurs).

La puissance représente le transfert d'énergie d'une source vers une charge sur une durée déterminée. La part d'énergie non active véhiculée pendant cette durée est appelée puissance réactive Q , et la part convertie par la charge en une autre forme d'énergie est appelée puissance active P .

Le résultat du calcul des puissances active et réactive dépend donc non seulement de la forme d'onde des tensions et des courants, de leur déphasage, mais aussi de la fenêtre temporelle d'observation T .

Puissance apparente

La puissance apparente est particulièrement utile pour le dimensionnement lors de la conception d'installations électriques. Elle est déduite des valeurs efficaces de la tension et du courant en régime monophasé; elle n'est donc pas signée.

$$S = U_{trms} * I_{trms} \quad (3)$$

La puissance apparente totale (collective) S_{Σ} d'un système triphasé est calculée à partir des valeurs (collectives) des tensions U_{Σ} et des courants I_{Σ} telles que définies dans la DIN 40110-2.

$$S_{\Sigma} = U_{\Sigma} * I_{\Sigma} \quad (4)$$

La définition de ces variables est abordée plus en détail dans la section "Puissance réactive en triphasé".

Puissance active

Comme mentionné précédemment, la puissance active P représente la part de la puissance transportée vers la charge et convertie par celle-ci, dans l'intervalle de temps considéré $T = t_2 - t_1$. La puissance active est définie comme étant la valeur moyenne de la puissance instantanée $p(t)$, dont le signe algébrique indique la direction du flux d'énergie, relativement au sens de comptage.

$$P = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt = \frac{E}{T} \quad (5)$$

Contrairement à la puissance apparente, la puissance active constitue une moyenne temporelle, dont la valeur totale (collective) du système triphasé P_{Σ} est obtenue par la somme des puissances actives monophasées.

$$P_{\Sigma} = P_1 + P_2 + P_3 \quad (6)$$

Puissance réactive

La puissance réactive correspond à la partie de la puissance qui transite entre la source et la charge sans être convertie

par cette dernière, dans l'intervalle de temps considéré T . Elle résulte généralement de la relation:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (7)$$

La valeur de la puissance réactive est donc habituellement calculée à partir des puissances apparente et active, sans relation directe avec la tension et le courant.

La puissance réactive totale (collective) Q_{Σ} d'un système électrique est constituée de 5 composantes de puissances réactives, de natures différentes, sommées quadratiquement.

$$Q_{\Sigma} = \sqrt{Q_{h1}^2 + Q_{hn}^2 + Q_d^2 + Q_m^2 + Q_u^2} \quad (8)$$

Tableau 1: Composition de la puissance réactive

Grandeur	Définition	Cause
Q_{h1}	Puissance réactive fondamentale	Déphasage φ_1
Q_{hn}	Puissance réactive harmonique	Déphasages φ_i
Q_d	Puissance réactive de distorsion	Courants harmoniques
Q_m	Puissance réactive de modulation	Fluctuations de puissance
Q_u	Puissance réactive de déséquilibre	Déséquilibre du système triphasé

Il convient de distinguer le régime triphasé du régime monophasé, afin de calculer la valeur de la puissance réactive.

Puissance réactive en monophasé

En monophasé, les constituants Q_{h1} , Q_{hn} , Q_d et Q_m peuvent apparaître dans la composition de la puissance réactive. La composante réactive de déséquilibre ne s'observe qu'en triphasé.

Puissance réactive fondamentale et harmonique

Les puissances réactives harmoniques Q_{h1} und Q_{hn} sont issues du déphasage φ_{hi} entre les tensions et les courants de même fréquence

$$Q_{h1} = U_{h1} \cdot I_{h1} \cdot \sin \varphi_{h1} \quad (9a)$$

$$Q_{hn} = \sqrt{\sum_{i=2}^n (U_{hi} \cdot I_{hi} \cdot \sin \varphi_{hi})^2} \quad (9b)$$

La composante Q_{h1} représente la puissance réactive (de déplacement) de l'onde fondamentale de la tension et du courant, alors que Q_{hn} traduit la somme des puissances réactives (de déplacement) de tous les rangs harmoniques.

Les exemples A et B du Tableau 2 illustrent l'influence de la puissance réactive sur le dimensionnement du réseau, comme les câbles dont la section est liée à leur capacité à transporter le courant dans de bonnes conditions.

Dans les deux cas, la même puissance active (puissance moyenne sur une période) $P = 1,012 \text{ kW}$ est consommée.

Dans l'exemple A, la tension et le courant sont en phase ($\varphi_{h1} = 0^\circ$).

Le graphique de l'évolution temporelle de la puissance instantanée de la Figure 1 montre une puissance $p_A(t)$ issue du produit des deux signaux en phase, donc toujours positive et unidirectionnelle. Il n'y a pas d'échange de puissance réactive.

Tableau 2: Exemples pour la puissance réactive fondamentale

Grandeur	Exemple A	Exemple B
U_{h1}	230 V	230 V
I_{h1}	4,4 A	8,8 A
φ_{h1}	0°	60°
P	1012 W	1012 W
S	1012 VA	2024 VA
Q_{h1}	0 Var	1752 VAr

Dans l'exemple B, la même puissance active est transmise avec un déphasage entre tension et courant de $\varphi_{h1} = 60^\circ$. Ce déphasage engendre un flux de puissance négatif en début de période, devant ensuite être compensé par un flux de puissance positif plus important. Ce dernier nécessite une augmentation du courant de 4.4 A dans l'exemple A à 8.8 A dans l'exemple B, afin de pouvoir maintenir le même niveau de puissance active.

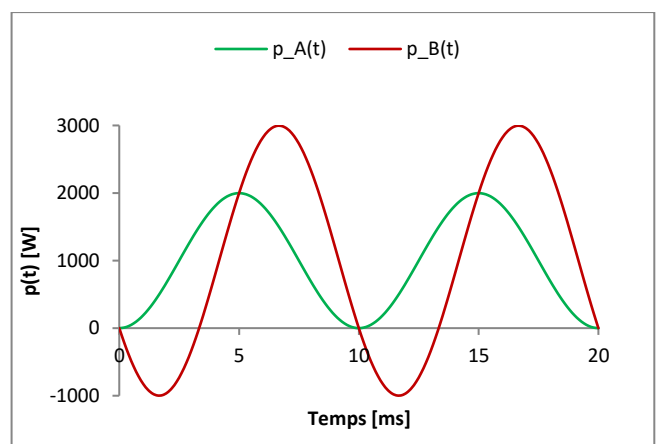


Figure 1: Puissance instantanée sur une période avec et sans puissance réactive

L'augmentation du courant produit une contrainte plus importante sur le réseau qui se manifeste par l'augmentation de la puissance apparente (de 1024 VA à 2048 VA) inhérente à l'accroissement de la puissance réactive $Q_{h1} = 1745$ VAR.

La puissance réactive fondamentale est la seule composante réactive dont le signe décrit la nature du circuit. Dans le sens de la consommation, la puissance réactive est capacitive quand elle est négative et inductive quand elle est positive.

Puissance réactive de distorsion

En plus du déphasage entre la tension et le courant de même rang, les combinaisons des grandeurs de fréquences différentes contribuent elles aussi à la formation de puissance réactive, étant observé que la valeur moyenne sur une période fondamentale de la puissance résultante est toujours égale à zéro. En application de l'équation 5, aucune puissance active supplémentaire ne peut être constatée alors que le réseau est pollué, ce qui indique la présence de puissance réactive.

L'exemple C du Tableau 3 montre une tension sinusoïdale combinée à un courant fondamental de 4.4 A, et un courant harmonique de rang 5 ayant une valeur efficace de 2 A.

Le courant harmonique ne contribue pas à la puissance active, mais fait osciller la puissance instantanée autour de la courbe de puissance idéale (Figure 2).

Tableau 3: Exemple de puissance réactive de distorsion

Quantité	Exemple A	Exemple C
U_{h1}	230 V	230 V
I_{h1}	4,4 A	4,4 A
I_{h5}	0 A	2 A
φ_{h1}	0°	0°
φ_{h5}	0°	0°
P	1012 W	1012 W
S	1012 VA	1112 VA
Q_d	0 VAR	460 VAR

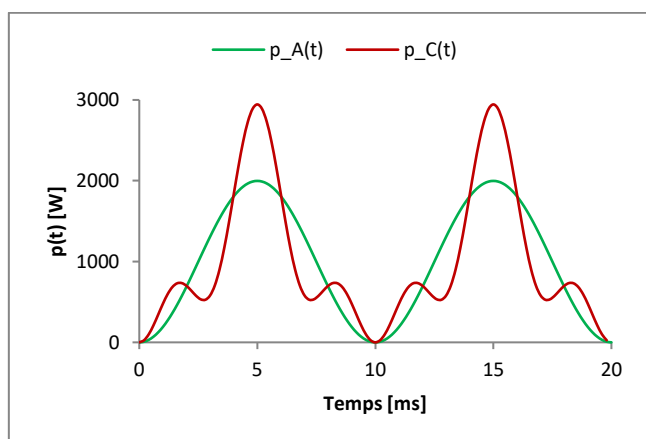


Figure 2: Puissance instantanée sur une période, avec de la puissance réactive de distorsion

La puissance réactive de distorsion qui en résulte Q_d peut être calculée à partir de la puissance apparente S , issue du produit de la tension du réseau et de la somme vectorielle de chacun des courants I_{tot} .

$$I_{tot} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2} \quad (10)$$

$$S = U_{1N} * I_{ges} \quad (11)$$

$$Q_d = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (12)$$

Puissance réactive de déplacement et de distorsion

En considérant des courbes de tension et de courant réalistes, une combinaison de composantes réactives de natures différentes apparaît. Les composantes individuelles ne doivent pas être combinées directement mais plutôt quadratiquement sommées, ainsi que l'équation 8 le décrit

La Figure 3 représente la combinaison des puissances réactives des exemples B (Q_1) et C (Q_d). La puissance réactive totale résulte de l'addition quadratique de Q_1 et Q_d comme formulé dans l'équation 13.

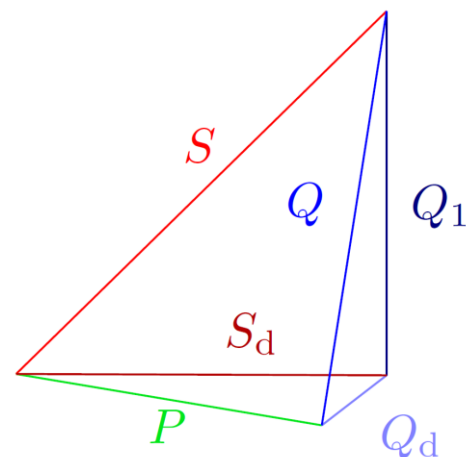


Figure 3: Puissances réactives de déplacement et de distorsion combinées

$$Q = \sqrt{Q_d^2 + Q_{h1}^2} = 1811 \text{ VAR} \quad (13)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 2075 \text{ VA} \quad (14)$$

La puissance réactive de modulation

Alors que les puissances réactives de déplacement et de distorsion peuvent être évaluées sur une durée de mesure courte, réduite jusqu'à la demi-période de la fréquence industrielle du réseau, la puissance réactive de modulation ne peut être, elle, observée de façon établie que sur des durées de mesure plus longues.

La durée d'observation adaptée à la mesure de la puissance réactive de distorsion dépend donc beaucoup des

caractéristiques fonctionnelles de l'équipement à analyser (p.ex. un appareil de chauffage discontinu, à ventilation mécanique).

L'exemple du Tableau 4 montre le fonctionnement d'un tel appareil de chauffage à ventilation permanente, chauffant en tout ou rien à une fréquence de 1 Hz (durée de période de modulation de 1 s).

Dans la première partie de la période de fonctionnement (500 ms), le chauffage et le ventilateur fonctionnent simultanément en appelant un courant de 15 A. Au cours de la seconde partie, seul le ventilateur tourne, réduisant le courant consommé à 5A. Afin de simplifier l'analyse et le calcul, le courant est considéré comme sinusoïdal et en phase avec la tension, de telle sorte que ne soient produites ni de la puissance réactive de déplacement, ni de distorsion.

Tableau 4: Exemple d'un chauffage discontinu ventilé

Fonctionnement	Grandeurs
Chauffage + Ventilation	$T_A = 500 \text{ ms}$ $P_A = 3450 \text{ W}$ $I_A = 15 \text{ A}$ $Q_{h1,A} = Q_{d1,A} = 0 \text{ VAr}$
Ventilation	$T_B = 500 \text{ ms}$ $P_B = 1150 \text{ W}$ $I_B = 5 \text{ A}$ $Q_{h1,B} = Q_{d1,B} = 0 \text{ VAr}$
Période de modulation	$T_{mod} = 1000 \text{ ms}$
Tension	$U_{trms} = 230 \text{ V}$

Dans cet exemple, le résultat de la mesure de puissance dépend en grande partie du choix de l'intervalle de mesure. Pour une durée inférieure à la période de modulation (p.ex. $T = 300 \text{ ms}$), la valeur de la puissance fluctue continuellement suivant les variations des valeurs moyennes des oscillations de la puissance, dans la fenêtre temporelle choisie (voir Figure 4).

C'est seulement lorsque l'intervalle de mesure est réglé en un multiple de la période de modulation T_{mod} que les valeurs de puissance deviennent constantes.

Il est à noter que la puissance active calculée P_{tot} diffère de la puissance apparente S_{tot} , en l'absence des puissances réactive de déplacement et de distorsion définies précédemment.

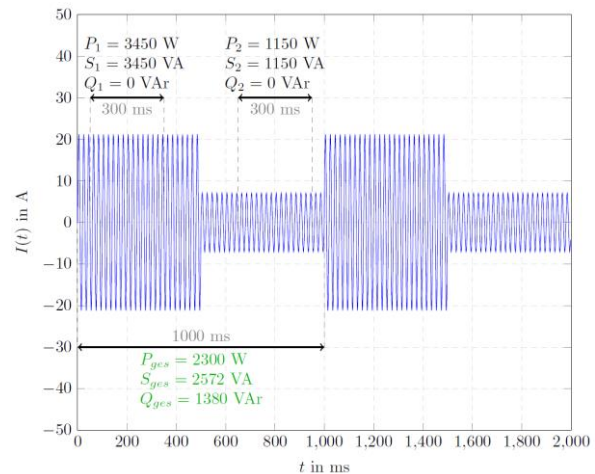


Figure 4: Évolution du courant du chauffage ventilé

Cette différence s'explique par la notion de puissance réactive de modulation Q_m . Ce type de puissance réactive est caractérisé par le fait que la ligne entre la source et la charge est idéalement utilisée lors de chacune des phases individuelles de modulation, mais ne l'est plus si l'on considère le cycle complet mesuré.

Une transmission idéale relative à l'exemple du Tableau 4 serait établie avec une puissance moyenne constante calculée sur la période de modulation $P = 2300 \text{ W}$. En présence d'une fluctuation de puissance issue de la modulation, la ligne est alors plus chargée dans la première période et l'est moins dans la seconde, ce qui provoque une augmentation des pertes globales de transport. La transmission peut être ramenée à un fonctionnement à puissance plus constante, avec par exemple un système de stockage d'énergie installé au point de raccordement de la charge.

Afin de déterminer la valeur de la puissance réactive de modulation, la puissance active P_{tot} est tout d'abord calculée sur l'intervalle considéré de 1000 ms , à partir du produit de la moyenne arithmétique des courants efficaces des deux cycles de modulation, et de la tension efficace (voir équation 15c).

Telle que prédéfinie, la puissance apparente S_{tot} se calcule à partir des valeurs efficaces de la tension et du courant sur un cycle complet de mesure, selon l'équation 15d. La différence géométrique entre les puissances apparente et réactive représente la puissance réactive Q_m selon l'équation 15e.

$$\bar{I} = \frac{I_A + I_B}{2} = 10 \text{ A} \quad (15a)$$

$$I_{trms} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{n=1}^m I_n^2} = 11,185 \text{ A} \quad (15b)$$

$$P_{tot} = U_{trms} \cdot \bar{I} = 2300 \text{ W} \quad (15c)$$

$$S_{ges} = U_{trms} \cdot I_{trms} = 2572 \text{ VA} \quad (15d)$$

$$Q_m = \sqrt{S_{ges}^2 - P_{ges}^2} = 1150 \text{ VAr} \quad (15e)$$

Facteur de puissance et $\cos \varphi$

Un système idéal est caractérisé par la transmission intégrale vers la charge de la puissance fournie à la source. Dans un tel cas, la puissance apparente correspond à la puissance active convertie par le consommateur.

Le facteur de puissance λ mesure la qualité d'un système souvent imparfait. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance active et la puissance apparente.

$$\lambda = \frac{|P|}{S} \quad (16)$$

Ce facteur, égal à $\lambda = 1$ dans le cas idéal, diminue vers 0 en même temps que la composante réactive augmente.

Le $\cos \varphi$ fréquemment mentionné de façon inappropriée, au lieu du facteur de puissance λ , n'est applicable qu'au cas des réseaux véhiculant des tensions et des courants en principe sinusoïdaux et symétriques. Son usage doit donc être exclusivement réservé à la puissance de l'oscillation à fréquence fondamentale

Puissance réactive en triphasé

Toutes les méthodes de calcul mentionnées jusqu'à présent ont été définies pour les systèmes monophasés et ne s'appliquent pas systématiquement et directement aux systèmes triphasés. Les seules valeurs de puissance pouvant être déterminées directement à partir de la somme des valeurs monophasées sont la puissance active, la puissance réactive de déplacement et la puissance réactive de distorsion.

La puissance apparente monophasée S n'étant pas une grandeur vectorielle, la puissance apparente d'un système triphasé ne peut pas être obtenue par l'addition (scalaire ou vectorielle) des puissances apparentes individuelles des différentes phases.

La puissance apparente totale (collective) S_{Σ} est définie par la DIN 40110-2 comme étant le produit de la tension collective U_{Σ} et du courant collectif I_{Σ} .

$$S_{\Sigma} = U_{\Sigma} * I_{\Sigma} \quad (17)$$

Dans le calcul des valeurs collectives, la différenciation suivante est effectuée entre les systèmes à 4 fils et à 3 fils:

4-Leiter System:

$$U_{\Sigma 4L} = \sqrt{U10_{trms}^2 + U20_{trms}^2 + U30_{trms}^2} \quad (17 a)$$

$$I_{\Sigma 4L} = \sqrt{I1_{trms}^2 + I2_{trms}^2 + I3_{trms}^2 + IN_{trms}^2} \quad (17 b)$$

3-Leiter System:

$$U_{\Sigma 3L} = \sqrt{\frac{1}{3}(U12_{trms}^2 + U23_{trms}^2 + U31_{trms}^2)} \quad (17 c)$$

$$I_{\Sigma 3L} = \sqrt{I1_{trms}^2 + I2_{trms}^2 + I3_{trms}^2} \quad (17 d)$$

Puissance réactive totale de modulation

L'amplitude de la puissance réactive de modulation d'un système triphasé dépend en premier lieu des puissances réactives de modulation par phase, mais ne peut pas être déterminée directement à partir des valeurs monophasées. Pour illustrer cela, un système triphasé est présenté avec les courants dans le Tableau 5. Chaque phase a un profil de courant modulé (1A / 0A) avec une période de 1 s et un rapport cyclique de 0,334.

La puissance réactive de modulation par phase est égale à $Q_{mod} = 110 \text{ VAR}$, sans qu'apparaisse ni puissance réactive de déplacement ni puissance de distorsion.

Tableau 5: Puissance réactive de modulation (en triphasé)

Phase	I	P	T_{on}	Q_{mod}
1	1 A	76 W	0,334 s	110 VAR
2	1 A	76 W	0,334 s	110 VAR
3	1 A	76 W	0,334 s	110 VAR

La puissance réactive de modulation du système triphasé $Q_{\Sigma,mod}$ dépend principalement de la répartition dans le temps des paquets d'oscillation.

L'exemple de la Figure 5 montre un système chargé de façon synchrone. La puissance totale P_{Σ} du système triphasé varie entre 0 W et 690 W. Une puissance réactive de modulation collective $Q_{\Sigma,mod} = 330 \text{ var}$ apparaît, dans ce contexte, égale à la somme des puissances réactives de modulation de chacune des phases

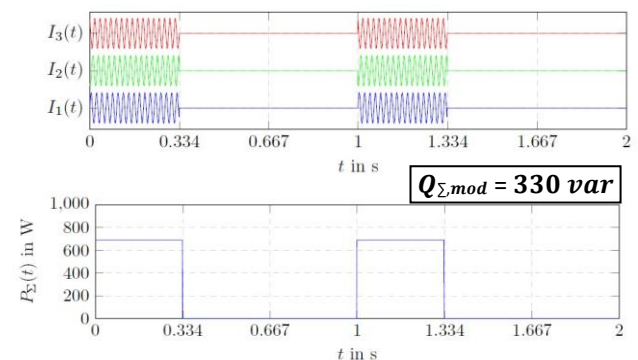


Figure 5: Charges synchrones

Si, au contraire, les paquets d'oscillations de chacune des phases sont décalés les uns par rapport aux autres d'un tiers de la période de modulation, comme le montre la Figure 6, la puissance active collective P_{Σ} reste constante. Il en résulte une puissance réactive de modulation collective du système triphasé réduite à la valeur 0, malgré une puissance réactive de modulation de 110 Var pour chacune des phases.

La relation suivante s'applique pour la puissance réactive de modulation:

$$0 \leq Q_{\Sigma,mod} \leq \sum_i Q_{i,mod} \quad (18)$$

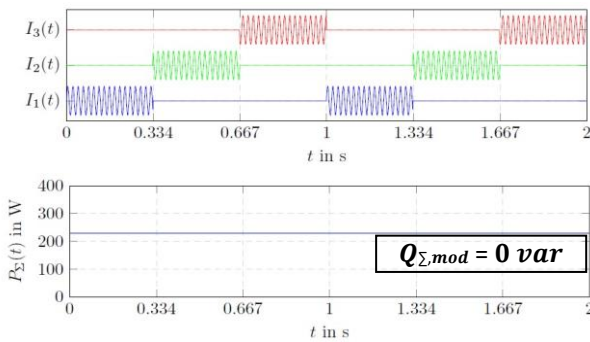


Figure 6: Charge déséquilibrée

Puissance réactive de déséquilibre

Dans un système triphasé, le facteur de puissance total peut être inférieur à 1, alors même que chacune des phases est idéalement chargée en permanence.

Ce cas est illustré par l'exemple du Tableau 6, lequel décrit un système à 4 fils avec des tensions symétriques et une charge ohmique triphasée. La première phase est chargée avec 5 A, la deuxième phase avec 3 A et la phase 3 avec 1 A. Le courant de neutre est dans ces conditions égal à $IN_{tmrs} = 3,464$ A.

Tableau 6: Exemple de puissance réactive de déséquilibre

Phase	U	I	P	S	λ
1	230 V	5 A	1150 W	1150 VA	1
2	230 V	3 A	690 W	690 VA	1
3	230 V	1 A	230 W	230 VA	1
Σ	398,4 V	6,85 A	2070 W	2730 VA	0,76

Afin de déterminer la puissance réactive, il faut tout d'abord calculer la puissance apparente totale S_{Σ} et la puissance active totale P_{Σ} .

$$U_{\Sigma 4L} = \sqrt{230V^2 + 230V^2 + 230V^2} = 398,37V \quad (19a)$$

$$I_{\Sigma 4L} = \sqrt{5A^2 + 3A^2 + 1A^2 + 3,464A^2} = 6,85A \quad (19b)$$

$$S_{\Sigma} = 398,37V * 6,85A = 2730 VA \quad (19c)$$

$$P_{\Sigma} = 1150W + 690 W + 230W = 2070W \quad (19d)$$

La puissance réactive peut être ensuite déduite en appliquant l'équation 7, avec un facteur de puissance $\lambda = 0,76$.

$$Q = \sqrt{2730 VA^2 - 2070 W^2} = 1780Var \quad (19e)$$

L'influence de la charge triphasée déséquilibrée sur la transmission de puissance est mise en évidence, via la comparaison avec un système équilibré (Figure 8).

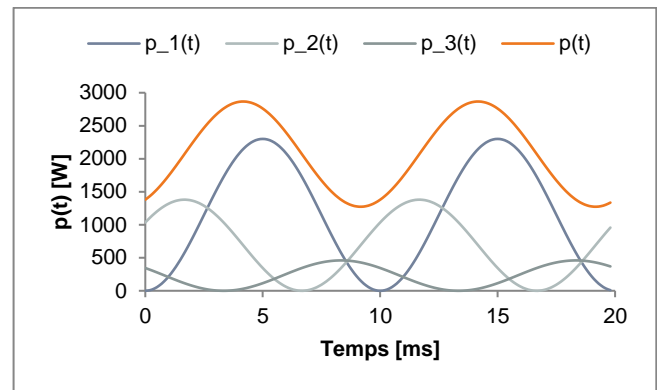


Figure 7: Puissance instantanée en triphasé (déséquilibré)

En régime déséquilibré (voir la Figure 7), la puissance instantanée $p(t)$ oscille entre 1450 W et 2800 W sur la durée d'une période de la fréquence du réseau. La ligne entre la source et la charge n'est donc pas utilisée de façon optimale dans le temps, dès lors que la puissance est alternativement supérieure et inférieure à la puissance moyenne de 2070 W.

En régime équilibré, tel qu'illustré par la Figure 8 et pour une puissance moyenne identique, la puissance instantanée totale $p(t)$ est constante à 2070 W. Cela correspond à un usage idéal de la ligne de transmission, avec un facteur de puissance égal à 1.

Le courant collectif I_{Σ} est alors réduit à 5,196 A.

$$I_{\Sigma 4L} = \sqrt{3A^2 + 3A^2 + 3A^2 + 0A^2} = 5,196A \quad (20)$$

Phase	U	I	P	S	λ
1	230 V	3 A	690 W	690 VA	1
2	230 V	3 A	690 W	690 VA	1
3	230 V	3 A	690 W	690 VA	1
Σ	398,4 V	5,196 A	2070 W	2070 VA	1

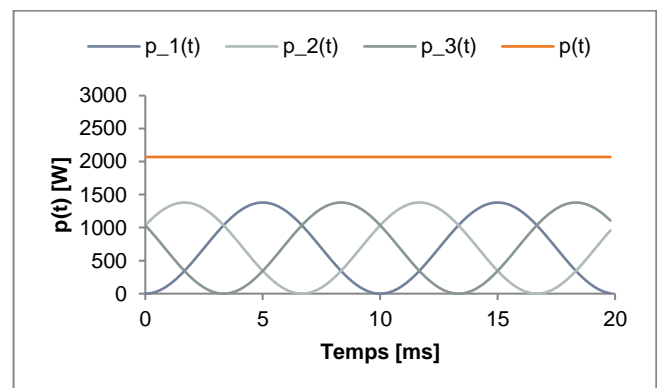


Figure 8: Puissance instantanée en triphasé (équilibré)

La mesure de puissance en pratique

Les analyseurs et enregistreurs portables conçus par A. Eberle (les PQ-Box 50, 100, 150, 200 et 300) offrent une va-

riété d'options de réglage permettant de mesurer correctement les différents types de réseaux d'alimentation selon l'application, tel que montré à la Figure 9.

Pour l'enregistrement des données à long terme et le calcul des puissances apparentes, réactive et active associées, il existe deux intervalles de mesure librement paramétrables : l'intervalle de N secondes peut être réglé de 1 à 600 s et les grandeurs de puissance et d'énergie sont enregistrées sur une durée additionnelle prédéfinie à 10, 15 ou 30 minutes.

Toutes les composantes de la puissance réactive précédemment décrites (déplacement, distorsion, modulation et déséquilibre) sont systématiquement calculées en tant que mesure cyclique dans les classes d'intervalle de mesure sélectionnées.

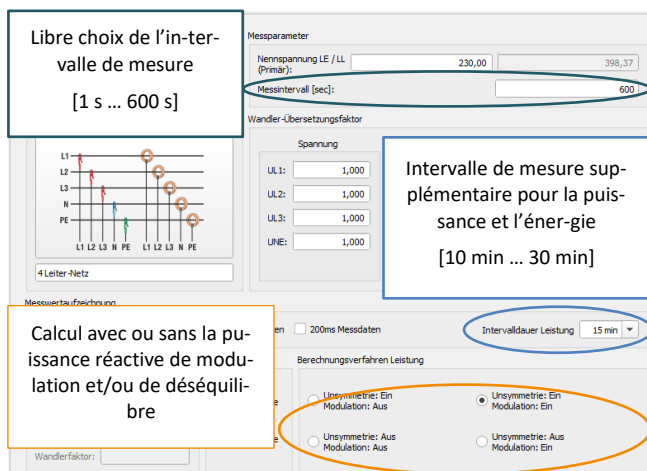


Figure 9: Réglage de base du PQ-Box

Choix de la méthode de calcul selon l'application

Les puissances réactives fondamentale, harmonique et de distorsion sont significatives pour tous les points de mesure. En revanche, lors de la mesure de la puissance réactive de déséquilibre, les conditions aux limites de la mesure ainsi que la position du point de mesure dans le réseau doivent être prises en compte afin d'obtenir des données significatives.

La Figure 10 illustre un réseau de distribution basse tension semi-urbain, desservi par un transformateur 20kV/400V et alimentant des charges domestiques essentiellement monophasées ainsi qu'une installation industrielle avec une charge biphasée (p.ex. une unité de soudage).

Le choix de considérer les pertes de puissance liées au déséquilibre est essentiellement déterminé par la longueur des tronçons de câbles, chargés par la puissance réactive à déterminer.

Lors d'une mesure dans un secteur résidentiel où les charges raccordées sont en majorité monophasées, des déséquilibres importants peuvent apparaître. La puissance réactive de déséquilibre mesurable n'a cependant pas vraiment de signification ici, dès lors que la charge du système

triphase varie d'un nœud à l'autre et que, de ce fait, aucune longue section de réseau n'est soumise à une charge fortement déséquilibrée.

Il est au contraire judicieux d'observer les pertes de puissance liées au déséquilibre lors de mesures effectuées directement au niveau du transformateur ou sur de longues lignes alimentant des charges déséquilibrées, comme illustré à la Figure 10.

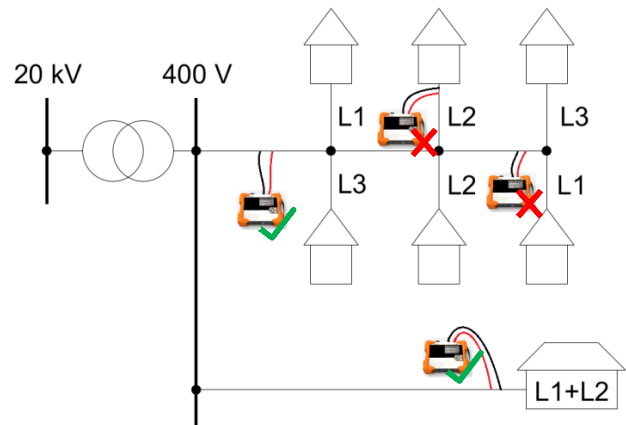


Figure 10: Application à la puissance réactive de déséquilibre

Interprétation des résultats de mesure

Dans le logiciel d'analyse et d'évaluation WinPQ mobil, les composantes de puissance sont regroupées selon leur type. La puissance réactive fondamentale de la Figure 11 indique la valeur de la puissance réactive fondamentale QV de chaque phase. Le signe de cette puissance réactive indique la nature du circuit, négatif pour un circuit capacitif et positif pour un circuit inductif.

La somme des puissances réactives par phase renvoie toujours à la puissance réactive fondamentale Q totale.

La puissance réactive de distorsion D n'a pas de signe et peut aussi être obtenue par addition des valeurs par phase (voir Figure 11).

Puissance réactive fondamentale		Puissance de distorsion	
QV1:	-28.067 Var	D1:	153.575 Var
QV2:	-11.748 Var	D2:	65.979 Var
QV3:	-19.872 Var	D3:	85.673 Var
Q totale:	-59.687 Var	D totale:	305.228 Var

Figure 11: Puissance réactive fondamentale et de distorsion

La situation diffère pour la puissance réactive de modulation. Comme décrit dans la section « Puissance réactive totale de modulation », la puissance totale $Q_{\Sigma,mod}$ ne peut pas être déterminée directement à partir des quantités monophasées, mais dépend de la corrélation temporelle entre phases des courbes de puissance.

Puissance réactive de modulation		Puissance réactive de déséquilibre	
Q mod 1:	4.412 Var		
Q mod 2:	1.931 Var		
Q mod 3:	2.493 Var		
Q mod totale:	9.379 Var		
		Qu:	138.628 Var

Figure 12: Puissance réactive de modulation et de déséquilibre

La puissance réactive totale est calculée conformément à l'équation 8, en y incluant seulement les grandeurs définies dans les réglages de base de l'appareil de mesure (voir le Tableau 7).

Tableau 7: Méthode de calcul de la puissance réactive

Réglage	Méthode de calcul
Sans déséquilibre Sans modulation	$Q_{\Sigma} = \sqrt{Q_{h1}^2 + Q_d^2}$
Avec déséquilibre Sans modulation	$Q_{\Sigma} = \sqrt{Q_{h1}^2 + Q_d^2 + Q_u^2}$
Sans déséquilibre Avec Modulation	$Q_{\Sigma} = \sqrt{Q_{h1}^2 + Q_d^2 + Q_m^2}$
Avec déséquilibre Avec Modulation	$Q_{\Sigma} = \sqrt{Q_{h1}^2 + Q_d^2 + Q_m^2 + Q_u^2}$

Cette valeur de puissance est ensuite appliquée au calcul de la puissance apparente par phase et de la puissance apparente totale du système triphasé, comme indiqué à la Figure 13.

Puissance réactive totale		Puissance	
Q1:	152.215 Var	P1:	113.470 W
Q2:	65.331 Var	P2:	48.803 W
Q3:	86.191 Var	P3:	62.487 W
Q totale:	333.930 Var	P total:	224.760 W
		S1:	190.417 VA
		S2:	81.789 VA
		S3:	106.779 VA
		S totale:	403.790 VA

Figure 13: Puissances active, réactive et apparente totales (collectives)

Tableau 8: Résumé des composantes réactives de puissance en régimes monophasé et triphasé

Grandeur	Einphasensystem	Dreiphasensystem
Puissance réactive fondamentale	X	X ³
Puissance réactive harmonique	X	X ³
Puissance réactive de distorsion	X	X ³
Puissance réactive de modulation	X	X
Puissance réactive de déséquilibre	-	X