



**ESE**<sup>®</sup>  
EFFICIENCY  
SAVING  
ENVIRONMENT



**ant**  
EFFICIENCY  
SAVING  
ENVIRONMENT



IoT **INDUSTRY 4.0** Ready

**MADE IN ITALY**

RAPPORT TECHNIQUE



*division renforcement de l'efficacité énergétique*



# » SOMMAIRE /

<b>1. SITUATION ACTUELLE DES FOURNITURES</b> .....	<b>4</b>	<b>3. TECHNOLOGIES EXISTANTES</b> .....	<b>18</b>
1.1 LE PASSAGE À L'ÈRE NUMÉRIQUE .....	4	3.1 OPTIMISATION DE LA TENSION .....	18
1.2 LA PRODUCTION DISTRIBUÉE .....	5	3.2 REPHASAGE .....	18
1.3 SURTENSION OU SOUS-TENSION .....	6	3.3 FILTRAGE HARMONIQUE .....	19
1.4 DISTORSION HARMONIQUE .....	7	3.4 FILTRE EMI .....	20
1.5 ÉQUILIBRAGE DES PHASES .....	9	3.5 PROFILAGE DES CONSOMMATIONS .....	20
1.6 DÉPHASAGE .....	10	<b>4. ANT</b> .....	<b>21</b>
<b>2. RÉPONSE DES CHARGES</b> .....	<b>11</b>	4.1 CONSIDÉRATIONS INITIALES .....	21
2.1 AVANT-PROPOS .....	11	4.2 PROJET EN COURS .....	22
2.2 SURTENSION STATIONNAIRE SUR CHARGE OHMIQUE .....	12	4.3 DONNÉES DU PROJET ET SIMULATIONS .....	25
2.3 DÉPHASAGE .....	14		
2.4 DISTORSION HARMONIQUE .....	16		



## 1. SITUATION ACTUELLE DES FOURNITURES

Au cours des dernières années, nous avons assisté à 2 phénomènes très importants dans la distribution et l'utilisation de l'électricité au niveau mondial :

- Le passage à l'ère numérique
- La production distribuée

Ces 2 phénomènes ont un impact majeur sur la distribution de l'électricité et sa bonne gestion.

Analysons-les en détail.

### 1.1 LE PASSAGE À L'ÈRE NUMÉRIQUE

Il y a un peu plus d'une décennie, une véritable révolution a commencé dans tous les domaines, en raison de l'utilisation croissante des technologies numériques pour améliorer les performances des systèmes utilisés afin d'exécuter les fonctions technologiques les plus importantes. Les ordinateurs sont aujourd'hui utilisés de manière intensive dans toutes les structures et dans tous les domaines, de l'environnement domestique aux processus industriels les plus complexes. Aujourd'hui, toutes les machines couramment utilisées sont contrôlées et exploitées par des systèmes informatisés entièrement numériques. Mais ce n'est pas tout, des outils qui étaient encore inconcevables il y a quelques années (tablettes, smartphones, etc.) font leur apparition dans nos vies. Même des concepts de

base tels que l'éclairage passent de plus en plus aux technologies numériques, surtout grâce à l'avènement des LED. Nous examinerons plus loin les conséquences de ce phénomène sur les questions énergétiques et la gestion efficace de l'énergie. Pour l'instant, nous constatons que le développement de plus en plus massif des technologies numériques génère la présence de plus en plus importante de charges non linéaires connectées à nos installations.



## 1.2 LA PRODUCTION DISTRIBUÉE

Ces dernières années, surtout en Europe, mais dans le monde entier, la production d'électricité a profondément changé jusqu'à il y a vingt ans, la production d'électricité était considérablement centralisée, surtout grâce à l'exploitation de l'énergie atomique, qui lui a donné le pouvoir. possibilité de créer de grandes centrales électriques pour desservir une base d'utilisateurs de plus en plus nombreuse et énergivore. Toutefois, ces dernières années, la production d'électricité a également connu une révolution remarquable, principalement grâce à l'énergie photovoltaïque, qui, en partie grâce à des politiques d'incitation fortes, s'est de plus en plus imposée dans nos vies, mais aussi grâce à d'autres technologies telles que l'énergie éolienne, l'hydroélectricité, la cogénération, etc. connaissent un développement croissant.

La manière dont ce phénomène affectera la transmission de l'énergie aux utilisateurs finaux dépasse le cadre de cette discussion, mais il peut certainement être intéressant d'évaluer d'abord les principales différences entre les deux approches. Afin de simplifier la discussion, nous esquissons ci-dessous la situation du réseau de transmission de l'énergie électrique dans les deux cas afin d'évaluer qualitativement l'impact de ce changement sur l'utilisateur final :

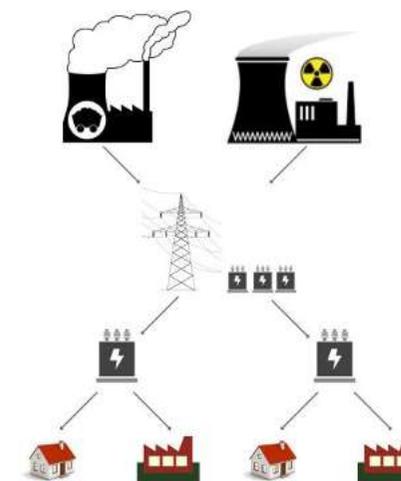


Figure 1 : Réseau de transmission à production centralisée

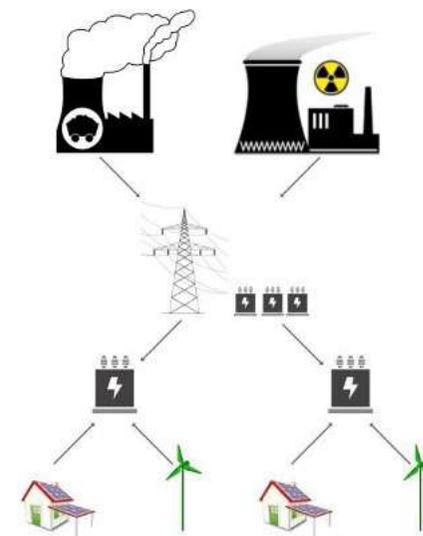


Figure 2 : Réseau de transmission à production décentralisée

Comme le montrent les 2 figures ci-dessus, la différence la plus importante que nous pouvons détecter est d'ordre topologique. En particulier, dans le cas de la production distribuée, l'électricité injectée dans le réseau passe toujours par des systèmes de distribution centraux avant d'arriver aux utilisateurs finaux, alors que dans le cas de la production centralisée, ce n'est pas toujours le cas ; l'électricité peut en somme être échangée directement du générateur à l'utilisateur sans passer par des systèmes de distribution centralisés

Ce phénomène a un impact significatif sur la qualité de l'énergie fournie par les générateurs, puisqu'il n'y a pas d'étapes intermédiaires pour l'équipement de distribution, l'énergie fournie par les générateurs distribués est moins efficace que celle fournie par les générateurs centralisés. Ces dernières années, dans le domaine de l'électricité et de l'électrotechnique, on entend de plus en plus parler de la qualité de l'énergie, c'est-à-dire de la qualité de l'énergie transmise des lignes électriques aux consommateurs.

### 1.3 SURTENSION OU SOUS-TENSION

La surtension est un phénomène par lequel le réseau transfère l'énergie à une tension supérieure à la tension nominale. Le phénomène peut être transitoire ou stationnaire. Dans le premier cas, l'écart par rapport à la valeur nominale se produit pendant quelques instants ou quelques cycles, avec des amplitudes de quelques volts à des centaines de volts, souvent dues à la commutation de charges inductives, de transformateurs

sous charge, etc..., bien sûr, ce type de perturbation peut également générer des inefficacités énergétiques, mais le véritable problème associé à ce type de perturbation est le risque d'endommager les appareils connectés au système. Dans le second cas, la perturbation peut être considérée comme stationnaire lorsque la tension d'alimentation est constamment supérieure à la tension nominale de fonctionnement qui, en Italie, est de 230 V pour les systèmes monophasés à basse tension et de 400 V pour les systèmes triphasés à basse tension. Même dans ce cas, la perturbation pourrait, à long terme, endommager les appareils connectés au système, bien que ce phénomène soit lié à la conception des appareils eux-mêmes, qui devraient avoir une tolérance de tension d'entrée de  $\pm 10\%$  mais le vrai problème est en revanche lié dans de nombreux cas à l'efficacité énergétique qui en résulte. En particulier, pour la plupart des charges linéaires connectées aux réseaux, une augmentation de la tension entraîne une réduction de la durée de vie des appareils et une augmentation de la consommation d'énergie sans amélioration notable des performances.

## 1.4 DISTORSION HARMONIQUE

La transmission de l'énergie sur le réseau électrique doit se faire au moyen d'une onde sinusoïdale à une fréquence de 50 Hz (en Italie) avec une tension nominale de 230 V, et cette onde se fermant sur des impédances linéaires doit générer un courant dans le circuit électrique, également sinusoïdal à une fréquence de 50 Hz, avec une amplitude dépendant de la partie ohmique de l'impédance et au maximum un déphasage par rapport à l'onde de tension dépendant de la partie imaginaire de l'impédance elle-même. Nous avons utilisé le terme « devrait » en référence à la fois à la tension d'entrée et à la génération de courant de ligne, car dans le premier cas, il n'est pas certain que l'onde de tension soit parfaitement sinusoïdale à l'entrée, mais même si elle l'est, il n'est pas certain que l'onde de courant résultante soit parfaitement sinusoïdale. D'un point de vue mathématique, l'onde en question est de toute façon périodique et peut donc être développée en série de Fourier, en la représentant comme la somme d'une infinité de composantes sinusoïdales de fréquence, d'amplitude et de phase différentes. Techniquement, les différentes composantes du développement en série sont appelées harmoniques ; en particulier, l'onde sinusoïdale à la fréquence fondamentale est également une harmonique.

Si l'on considère un circuit électrique alimenté par une onde sinusoïdale pure et fermé uniquement sur des charges linéaires, comme nous venons de le mentionner, l'onde de courant résultante aura une seule

composante à la fréquence de l'alimentation et n'aura pas de composante harmonique à une fréquence autre que la fondamentale, alors que dans le cas où au moins une des charges est non linéaire, des harmoniques de courant à une fréquence autre que la fondamentale peuvent se produire, en négligeant le phénomène des inter-harmoniques pour le moment, pour les charges électriques, les composantes de courant résultantes ayant une plus grande contribution sont généralement celles à des fréquences multiples de la fondamentale, par conséquent les harmoniques produites peuvent être ordonnées numériquement en se référant au multiple de la fréquence d'intérêt, c'est-à-dire par exemple une deuxième harmonique est une harmonique à deux fois la fréquence de la fondamentale. En outre, pour la plupart des charges non linéaires connectées aux réseaux (par exemple, les alimentations à découpage), les harmoniques ayant l'amplitude la plus élevée sont celles d'ordre impair, la troisième, la cinquième, la septième, etc. De plus, dans les cas réels, les harmoniques ont généralement une contribution d'amplitude plus importante dans les nombres ordinaux inférieurs et sont donc décroissantes, c'est-à-dire qu'en général, la troisième harmonique a une amplitude plus importante que la cinquième, la cinquième que la septième, et ainsi de suite. Bien entendu, même dans ce cas, les situations individuelles doivent être analysées car différentes charges non linéaires connectées au réseau en question peuvent générer une contribution harmonique différente l'une de l'autre, et donc la somme de ces contributions peut être différente.

En se référant à l'onde de courant générée, il est possible de définir la distorsion harmonique totale comme suit :

$$THD_i = \frac{I_t - I_f}{I_f} = \frac{\sum_2^{\infty} I_n - I_f}{I_f}$$

où :

$I_t$  est le courant total

$I_f$  est le courant à la fréquence fondamentale

Il en va de même pour l'onde de tension :

$$THD_v = \frac{V_t - V_f}{V_f} = \frac{\sum_2^{\infty} V_n - V_f}{V_f}$$

Et plus généralement pour la puissance transmise :

$$THD_p = \frac{P_t - P_f}{P_f}$$

Cet indice nous renseigne, comme son nom l'indique, sur la distorsion globale présente dans les formes d'onde. Naturellement, plus la valeur est supérieure à 0, plus la forme d'onde s'éloigne du cas idéal. La présence de distorsions harmoniques en soi crée également des problèmes énergétiques dans les installations. Il est en effet possible de démontrer que la distorsion du courant a également un effet sur la forme d'onde de la tension alimentant les charges, et donc que ce phénomène a également des conséquences sur les charges linéaires connectées aux systèmes, et qu'il génère d'autres

pertes dans le système en raison de l'augmentation de la dissipation de puissance sur l'impédance de la ligne et l'impédance interne du générateur.

En général, une charge linéaire a une largeur de bande passante presque infinie, par exemple une ampoule à incandescence transforme toute l'énergie électrique qu'elle fournit en énergie thermique, ce qui signifie que par exemple l'ampoule est alimentée avec 5V à une fréquence de 400 Hz, le filament de l'ampoule va chauffer et de la chaleur sera générée par l'effet Joule.

Le problème est que la transformation en question ne génère pas d'émissions lumineuses dans la bande visible, ou plutôt elle génère une quantité minimale d'émissions lumineuses dans la bande visible et peut-être d'autres émissions dans des bandes lumineuses non visibles à l'œil nu, par exemple l'ultraviolet ou l'infrarouge, parce que le filament est conçu pour fonctionner à la fréquence du réseau.

Cela a 3 implications très importantes :

- Un fonctionnement en dehors des paramètres nominaux peut entraîner une défaillance prématurée de l'appareil.
- L'énergie lumineuse délivrée a une composante indésirable, de sorte que l'on peut dire que l'énergie excédentaire n'est pas utilisée pour effectuer le travail pour lequel l'appareil est conçu, mais qu'elle n'est en fait qu'une perturbation.
- L'émission de rayonnements en dehors de la lumière visible peut être nocive pour le corps humain qui y est exposé.

Si l'on considère d'autres types de charges comme les moteurs électriques, les pompes ou autres, les conséquences pourraient être encore plus graves.

Le résultat général est que ces distorsions transfèrent de l'énergie aux charges, qui l'utilisent en partie pour effectuer le travail pour lequel elles ont été conçues et en partie pour générer des inefficacités qui augmentent la possibilité de défaillance de la charge. Ainsi, outre le préjudice économique résultant de l'augmentation de la consommation d'énergie, il y a également le préjudice lié à la réduction de la durée de vie utile des appareils eux-mêmes.

## 1.5 ÉQUILIBRAGE DES PHASES

Dans le cas des systèmes triphasés, un autre facteur qui contribue négativement à la qualité de l'alimentation est le déséquilibre entre les phases, c'est-à-dire la différence entre les formes d'onde sur les phases individuelles de l'alimentation, ces différences peuvent en général être attribuables à la tension à la fréquence fondamentale ou aux harmoniques. Ces perturbations se produisent généralement lorsque des charges monophasées et des charges triphasées sont mélangées sur la même ligne. Là encore, ce phénomène a des conséquences énergétiques sur les charges triphasées connectées, ainsi que des conséquences en termes d'efficacité et de durée de vie des appareils. La littérature dans ce domaine nous apprend que la plupart des inefficacités sont générées par les moteurs triphasés connectés au système.

## 1.6 DÉPHASAGE

Une autre perturbation importante qui se produit dans les charges connectées à un réseau électrique est le déphasage entre la forme d'onde de la tension et la forme d'onde du courant généré. Le déphasage entre la tension et le courant en général ne génère pas en soi de problèmes énergétiques sur les charges, ou du moins ne génère pas de problèmes en termes d'énergie active absorbée par les charges, bien sûr la présence de déphasage génère des inefficacités et un plus grand engagement de puissance dans la phase de transmission de l'énergie. En général, même une charge linéaire, qui n'est pas complètement ohmique, génère un déphasage du courant par rapport à la tension d'alimentation, soit en avance, soit en retard, selon que la charge en question est ohmique-capacitive ou ohmique-inductive. Cela génère la transmission de la puissance dite réactive, en particulier la puissance réactive est une puissance qui n'est pas utilisée par les charges pour effectuer un travail mais simplement pour supporter le champ magnétique. Le problème, c'est que la puissance réactive est transmise par un courant inductif, ce qui augmente la charge sur les câbles électriques connectés au réseau, et en outre, une plus grande circulation de courant dans le circuit génère des pertes plus importantes sur les impédances en série du circuit lui-même, en particulier sur l'impédance interne du générateur et sur l'impédance de la ligne, générant ainsi des pertes ohmiques (donc de la puissance active) sur le système lui-même.

Ici, 2 facteurs sont importants pour l'équilibre énergétique et économique du système :

- Dans certains cas, l'utilisation de l'énergie réactive génère un coût pour l'utilisateur en termes de pénalités sur la facture.
- Le courant réactif circulant génère une dissipation d'énergie active sur la ligne.

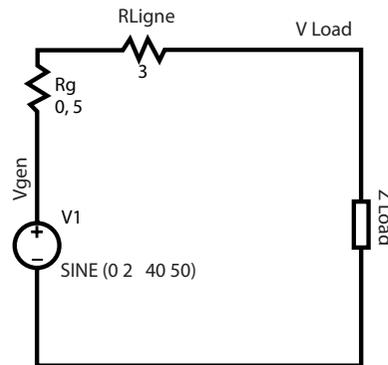
De plus, il est facile de démontrer que ce facteur a également des conséquences sur la tension d'alimentation des charges, car la chute de tension sur la ligne génère une tension utile plus faible sur la charge elle-même pour la même puissance totale absorbée, en d'autres termes, le transport de l'énergie devient très inefficace.

Très souvent, lorsqu'il est question de réseaux électriques, il est d'usage de parler du facteur de puissance, c'est-à-dire du rapport entre la puissance totale transmise (puissance apparente) et la puissance active, et ce facteur est généralement confondu avec ce que l'on appelle le coût. En particulier, cette dernière affirmation n'est vraie que si l'on considère uniquement des charges linéaires, de sorte que pour un réseau de charges linéaires, le coût correspond au facteur de puissance. En général, le facteur de puissance tient également compte de la distorsion harmonique totale.

## 2. RÉPONSE DES CHARGES

### 2.1 AVANT-PROPOS

Dans cette section, nous analyserons, également à l'aide de simulations, le comportement des charges en présence des perturbations susmentionnées. Pour simplifier, prenons l'exemple d'un circuit électrique de type domestique, d'une puissance contractuelle de 3 kW, qui peut être schématisé comme suit : C'est un modèle à paramètres concentrés qui sera utilisé pour les simulations.



*En particulier :*

- $R_g$  est la résistance « interne » du générateur
- $R_{Ligne}$  est la résistance de ligne du réseau, principalement due à la présence de câbles électriques pour la distribution de l'énergie. Pour des raisons de simplicité, les effets capacitifs et

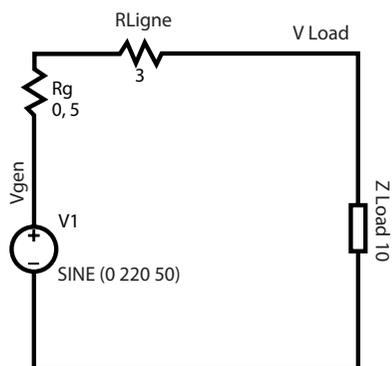
inductifs de l'impédance elle-même seront négligés ; la valeur résistive fixée à 3 Ohm correspond à environ 350 m de câble d'une section moyenne de 2 mm<sup>2</sup>.

- $Z_{Load}$  est l'impédance de charge, schématisée comme l'impédance équivalente vue du générateur. Le circuit considéré peut être divisé en deux sections, l'une étant la partie alimentation et l'autre la partie charges.

Pour évaluer le bilan énergétique du circuit lui-même, nous prendrons en compte un certain nombre de facteurs qui seront utiles de temps à autre, mais en général nous nous concentrerons sur la puissance active fournie par le générateur et la puissance active absorbée par la charge, de sorte que nous puissions évaluer l'efficacité du transfert de puissance dans différentes situations.

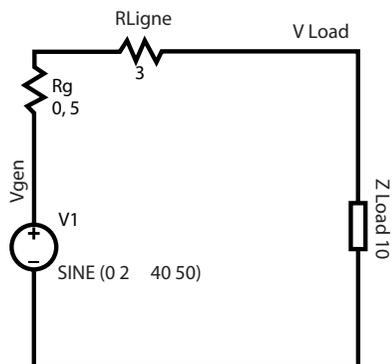
## 2.2 SURTENSION STATIONNAIRE SUR CHARGE OHMIQUE

Considérons comme premier exemple la présence d'une charge purement ohmique et analysons les effets d'une tension d'alimentation supérieure à la tension optimale sur le système, nous supposons une tension optimale de 220V :



Puissance active fournie par le générateur : 1785 W

Puissance active absorbée par la charge : 1322 W



Puissance active fournie par le générateur : 2124 W

Puissance active absorbée par la charge : 1573 W

Pour résumer :

### CHARGE OHMIQUE – EFFETS DES VARIATIONS DE TENSION STATIONNAIRES

	Tension de secteur optimale	Tension de secteur élevée
Tension d'alimentation :	220V	240V
Courant de ligne :	16.28A	17.73A
Facteur de puissance :	≈ 1	≈ 1
Distorsion harmonique totale :	0 %	0 %
Impédance résistive de la charge :	10 Ohm	10 Ohm
Puissance fournie par le générateur :	1785 W	2124 W
Puissance dissipée sur la charge :	1322 W	1573 W

## Considérations

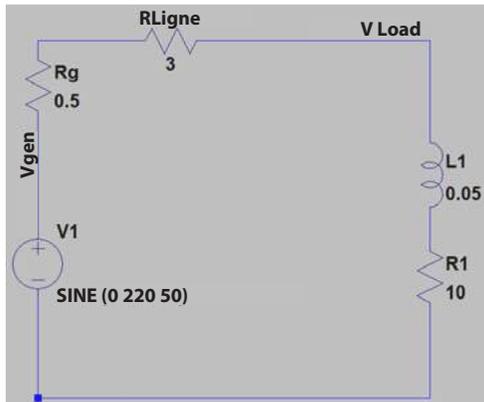
La première considération à faire est que dans le cas présent, la puissance totale engagée par le générateur est inférieure d'environ 16 % dans le cas d'une alimentation optimale. Naturellement, en raison de la linéarité du circuit, la puissance distribuée à la charge est également inférieure de 16 %, mais comme nous l'avons vu en traitant des effets des hautes tensions sur les charges, cela ne se traduit pas toujours par une augmentation de l'efficacité de la charge en question, par exemple s'il s'agit d'une ou plusieurs lampes à incandescence connectées en parallèle, il est certain qu'en les alimentant avec une tension plus élevée à la fréquence fondamentale, on obtiendra une énergie lumineuse plus élevée dans la bande visible, mais on obtiendra également une énergie plus élevée dans les autres bandes d'émission du luminaire, de sorte que la puissance lumineuse globale dans la bande visible ne sera pas augmentée de 16 %, mais d'un pourcentage plus faible. De plus, sortir de la plage de tension optimale pour le luminaire en question revient à raccourcir sa durée de vie de bien plus que 16 % ; des études de la société Omran, dans le cas des lampes à incandescence, montrent qu'alimenter une ampoule à 240V diminue sa durée de vie de 55 % par rapport à l'alimenter à sa tension nominale de fonctionnement.

Un autre facteur à prendre en compte est la perte d'énergie ohmique à travers le réseau, dans le cas de l'alimentation optimale nous avons une perte de  $(1785 - 1322)W = 463W$ , tandis que dans le cas de l'alimentation à plus haute tension nous avons  $(2124 - 1173)W = 551W$ ,

encore une fois, d'un point de vue relatif, le pourcentage de perte est le même, mais en valeur absolue, la perte de puissance est plus importante dans le cas de l'alimentation à plus haute tension, car nous avons environ 100 W de plus dissipés sur la ligne, ce qui signifie plus d'énergie comptabilisée au compteur, et plus de chauffage et d'inefficacité des câbles électriques.

## 2.3 DÉPHASAGE

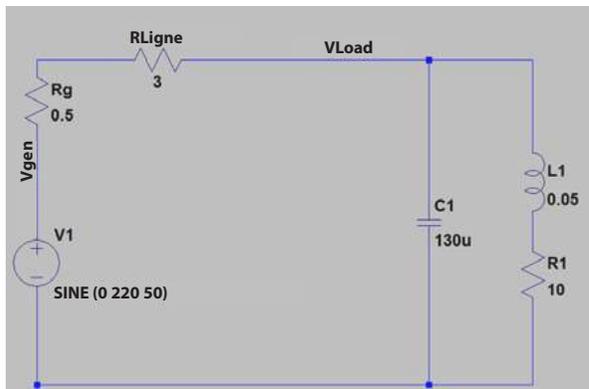
Considérons maintenant la présence d'une charge ohmique inductive dans le circuit :



Puissance fournie par le générateur : 632 W

Puissance absorbée par la charge : 561 W

Nous introduisons en parallèle à la charge une impédance capacitive afin d'obtenir à partir du même circuit une impédance ohmique équivalente vue du générateur :



Puissance fournie par le générateur : 758 W

Puissance absorbée par la charge : 573 W

Pour résumer :

### CHARGE OHMIQUE – EFFETS DES VARIATIONS DE TENSION STATIONNAIRES

	Charge équivalente ohmique	Charge équivalente ohmique-inductive
Tension d'alimentation :	220V	220V
Courant de ligne :	5.73A	8.03A
Facteur de puissance :	0.99	0.66
Distorsion harmonique totale :	0 %	0 %
Puissance fournie par le générateur :	758 W	632 W
Puissance dissipée sur la charge :	561 W	573 W

## Considérations

Pour le cas présent, nous pouvons noter 2 considérations importantes :

1. La puissance délivrée par le générateur dans le cas d'une charge ohmique inductive est environ 18 % plus élevée que dans le cas de son équivalent ohmique.
2. La puissance réellement utilisée par la charge est supérieure d'environ 3 %.

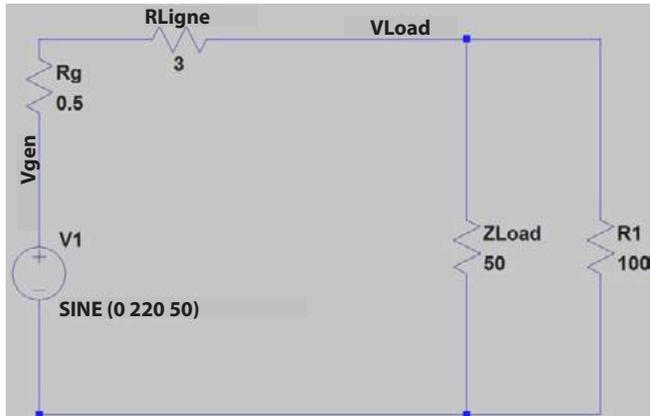
La première affirmation nous permet de dire qu'en améliorant le facteur de puissance du circuit, nous obtenons également une économie significative sur la puissance globale utilisée, de sorte que le bilan énergétique est positif dans ce cas, et nous constatons également que la charge elle-même en bénéficie puisque la puissance qu'elle utilise dans les mêmes conditions est légèrement plus élevée que dans le cas précédent.

Naturellement cette condition est vérifiée avec une tension d'alimentation de 220V, pour des tensions supérieures le problème est plus articulé, car l'insertion de charges inductives génère un déphasage avec une conséquente chute de tension sur la charge due à l'effet de l'impédance de la ligne, naturellement en effectuant le rephasage du système, la situation s'améliore d'un point de vue énergétique, de la même manière que nous venons d'analyser, mais en réalité nous nous retrouvons dans la condition précédente de surtension stationnaire

de la charge, donc la dissipation sur la charge doit de toute façon être remodelée afin de la faire fonctionner dans ses conditions optimales de fonctionnement, ce dernier facteur génère des économies encore plus importantes et est donc un élément souhaitable, que nous traiterons plus tard.

## 2.4 DISTORSION HARMONIQUE

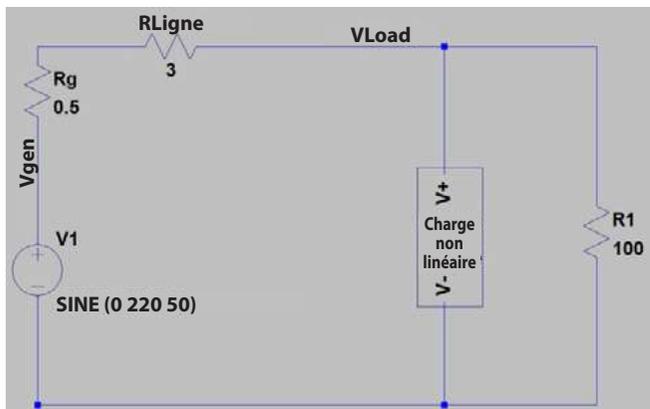
Considérons maintenant la présence de charges mixtes linéaires et non linéaires dans le circuit :



Puissance fournie par le générateur : 654 W

Puissance absorbée par la charge : 592 W

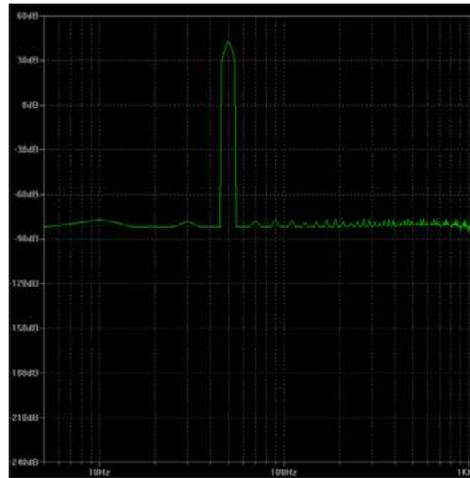
Nous remplaçons la charge de 50 ohms par une charge de même puissance mais non linéaire :



Puissance fournie par le générateur : 656 W

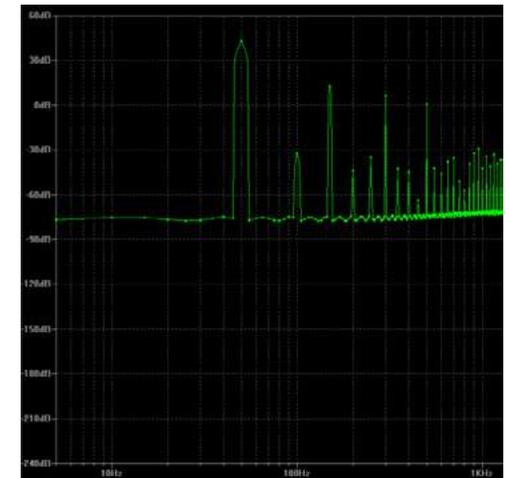
Puissance absorbée par la charge : 586 W

Examinons cette situation en détail, en considérant la transformée de Fourier de la tension sur la charge dans la bande 0 - 1kHz.



Circuit entièrement linéaire.

Distorsion harmonique totale : 0.000473 %



Circuit avec charge non linéaire

Distorsion harmonique totale : 3.550619 %

Pour résumer :

CHARGE OHMIQUE INDUCTIVE – EFFETS HARMONIQUES		
	Charge équivalente ohmique	Charge équivalente ohmique-inductive
Tension d'alimentation :	220 V	220 V
Courant de ligne :	4.21A	4.46A
Facteur de puissance :	≈ 1	0.95
Distorsion harmonique totale :	≈ 0 %	3.55 %
Puissance fournie par le générateur	654 W	656 W
Puissance dissipée sur la charge :	592 W	586 W

### Considérations

Dans le cas présent, 3 considérations peuvent être notées :

- La puissance de sortie du générateur dans le cas d'un circuit non linéaire est environ 0,4 % plus élevée que dans le cas de son équivalent ohmique.
- La puissance totale transmise à la charge est supérieure d'environ 1 %.
- La puissance transmise à la charge à une fréquence de 50 Hz est inférieure de 3,5 %, ce pourcentage étant transmis hors bande.

Dans ce cas, la charge non linéaire génère une circulation de courant avec un contenu harmonique hors bande élevé ; ce courant en lui-même ne génère pas de problèmes pour les autres charges puisqu'il

circule uniquement entre le générateur et la charge concernée. Le problème est que la variation de tension sur l'impédance de la ligne a également un contenu harmonique élevé, et donc la tension d'alimentation globale des charges est affectée par des distorsions harmoniques qui dépendent, comme mentionné, de la puissance de la charge déformante et de l'impédance de la ligne, naturellement ces distorsions sont absorbées par les charges ohmiques et transformées en chaleur, sans vraisemblablement aucun avantage en termes d'efficacité, et même avec des inconvénients parfois substantiels en ce qui concerne la durée de vie de l'appareil. Nous pouvons donc affirmer que, si du point de vue du bilan énergétique, il ne semble pas y avoir de grandes variations (1 %), du point de vue de l'efficacité des charges, il y a des variations plus importantes (3-4 %), de sorte que la puissance totale absorbée par la charge est pratiquement inférieure de 5 % si l'on considère la puissance utile pour le travail (celle fournie à 50 Hz).

## 3 TECHNOLOGIES EXISTANTES

### 3.1 OPTIMISATION DE LA TENSION

L'optimisation de la tension est une technique d'économie d'énergie qui consiste à installer un transformateur en série avec la ligne d'alimentation afin de diminuer ou d'augmenter la tension disponible pour la charge.

L'optimisation peut se faire de manière statique ou dynamique, selon que la tension est diminuée de manière fixe d'un certain pourcentage ou qu'elle varie de manière dynamique pendant le fonctionnement normal du circuit.

Normalement, il y a une économie d'énergie, comme nous avons eu l'occasion de l'apprécier dans les simulations précédentes, en présence de charges à prédominance ohmique avec des problèmes de surtension stationnaires, ou en tout cas linéaires, dans le cas de charges non linéaires particulières (telles que comme les alimentations à découpage par exemple) la réduction de tension peut même conduire à des augmentations de consommation, en effet, ces charges fonctionnent à puissance constante, c'est à dire qu'elles absorbent toujours la même quantité d'énergie même face aux variations de tension, donc une tension décroissante cette variation entraîne une augmentation du courant dans le nœud, et donc dans la ligne, ce courant augmente naturellement les pertes sur les câbles de transmission.

### 3.2 REPHASAGE

Le rephasage est toute mesure utilisée pour augmenter (ou, comme on le dit couramment, améliorer) le facteur de puissance ( $\cos \phi$ ) d'une charge donnée, afin de réduire la valeur du courant circulant dans le système avec la même puissance active absorbée. Le but du rephasage est avant tout de diminuer les pertes d'énergie et de réduire l'absorption de puissance apparente en fonction des machines et des lignes existantes sur un site industriel. Le rephasage des installations a pris de l'importance lorsque le distributeur d'électricité a imposé des clauses contractuelles par le biais des mesures tarifaires de la CIP (n° 12/1984 et n° 26/1989) obligeant l'utilisateur à rephaser son installation sous peine de pénalités à payer. Dans les circuits avec des consommateurs particuliers tels que les lampes à filament, les chauffe-eau, certains types de fours, la puissance apparente absorbée est toute la puissance active. Dans les circuits avec des utilisateurs qui ont des enroulements à l'intérieur, comme les moteurs, les soudeurs, les ballasts pour lampes fluorescentes, les transformateurs, une partie de la puissance apparente absorbée est utilisée pour exciter les circuits magnétiques et n'est donc pas utilisée comme puissance active, mais comme puissance généralement appelée puissance réactive. Du point de vue du bilan énergétique global, la correction du facteur de puissance diminue la quantité d'énergie réactive absorbée par le circuit, mais ne diminue pas directement l'énergie active utilisée, c'est-à-dire que la diminution

de l'énergie active est généralement une conséquence du fait que les pertes sur les conducteurs diminuent puisque l'impédance série des conducteurs eux-mêmes est traversée par un courant global plus faible, mais en réalité toute cette énergie active n'est pas économisée, car la dissipation plus faible sur les conducteurs entraîne une chute de tension plus faible sur la charge, et dans le cas de charges ohmiques, cela signifie une plus grande dissipation d'énergie.

Il est clair, cependant, que dans ce cas, l'énergie excédentaire est positive pour la charge, à moins que nous ne soyons dans le cas de surtensions stationnaires. Le rephasage des charges peut être centralisé, distribué ou mixte ; dans le premier cas, l'ensemble du système est rephasé en amont de la charge et en aval du générateur ; par conséquent, à la sortie du générateur, le coût s'améliore, mais il n'y a pas nécessairement d'amélioration dans chaque maillon du circuit ; dans le deuxième cas, les charges sont rephasées individuellement, et l'effet est une amélioration du coût global en aval du générateur ; dans le troisième cas, il existe une solution mixte entre les deux premières. Normalement, le rephasage des charges est obtenu en plaçant un générateur de puissance réactive en parallèle avec les charges elles-mêmes, en contre-phase de la puissance réactive de la charge, de sorte que la puissance réactive de sortie est annulée. Le générateur le plus simple de puissance réactive dans les circuits sinusoïdaux est le condensateur, de sorte qu'un ou plusieurs condensateurs sont insérés en parallèle

avec les charges afin d'obtenir une amélioration des coûts. Il existe cependant d'autres techniques telles que les compensateurs statiques ou les filtres actifs.

### 3.3 FILTRAGE HARMONIQUE

Le filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques se fait normalement en insérant des dispositifs dans le circuit pour diminuer la distorsion harmonique totale normalement dans le courant, afin d'améliorer également les effets de distorsion sur la tension. Il existe 2 grandes catégories de filtres adaptés à cet usage :

- **Filtres passifs**
- **Filtres actifs**

Dans le premier cas, il existe une distinction supplémentaire entre les filtres accordés et les filtres inductifs. Les filtres accordés sont des filtres RLC particuliers accordés sur une fréquence spécifique et généralement connectés à la terre. Dans certains cas, des filtres passe-bande ou passe-haut peuvent également être utilisés afin de créer un chemin à faible impédance vers la terre pour les perturbations à ces fréquences et d'éliminer les perturbations à l'origine. Dans le cas des inductances de ligne, par contre, le principe est celui des filtres passe-bas LR, en effet l'inductance de ligne forme avec le circuit ohmique en aval un filtre passe-bas qui ne laisse pas passer la puissance à des fréquences loin de 50 Hz. Ce type de solution améliore bien sûr la situation à la charge en atténuant le facteur de distorsion harmonique

totale, mais du point de vue du bilan énergétique la situation reste inchangée ; en effet, les perturbations sont acheminées vers la terre après avoir traversé le compteur, et l'énergie détournée vers la terre est donc toujours comptabilisée. Les filtres actifs sont, du point de vue de la charge, des générateurs de courant parallèles qui injectent un courant égal et opposé à celui de la charge déformante hors bande et annulent ainsi les courants harmoniques générés par les charges elles-mêmes.

Ils travaillent en modulant la tension de ligne, analysent la situation du réseau et injectent les courants de compensation. Naturellement, pour injecter correctement ces courants, ils nécessitent des fréquences de commutation très élevées, supérieures au double de la fréquence harmonique maximale, ils ont donc besoin. Dispositifs internes particulièrement efficaces et rapides, les IGBT sont généralement utilisés pour pouvoir travailler à la fréquence de commutation souhaitée. Cela rend naturellement ces dispositifs particulièrement onéreux. En outre, du point de vue du bilan énergétique, la situation est similaire à celle des filtres passifs, en ce sens qu'en fonction de l'efficacité des filtres  $i$ , une quantité équivalente d'énergie est absorbée pour compenser les perturbations. Ce qui est intéressant, c'est que les filtres actifs peuvent également améliorer les coûts du système car ils fonctionnent également comme des générateurs de puissance réactive. En outre, un autre aspect très intéressant est que des filtres de capacités différentes peuvent être insérés en parallèle sans perturber le circuit ni risquer la résonance.

### 3.4 FILTRE EMI

Le filtre EMI est un filtre passif que l'on trouve dans la plupart des équipements électroniques et qui permet à ces derniers de se conformer aux réglementations en matière de compatibilité électromagnétique, en particulier celles qui concernent les émissions conduites. Le filtre EMI est en somme un filtre passe-bas qui est connecté comme dernier étage entre l'équipement et l'alimentation, afin d'atténuer les composants de bruit que tout appareil électronique a tendance à émettre. Il est évident que le filtre doit être transparent à la fréquence d'alimentation (50-60 Hz) pour permettre à l'appareil de fonctionner correctement, tandis qu'il doit agir dans la gamme de fréquences fixée par la norme (150kHz-30MHz).

### 3.5 PROFILAGE DES CONSOMMATIONS

Il existe sur le marché un certain nombre d'appareils qui permettent d'établir le profil de la consommation des utilisateurs, c'est-à-dire de comprendre comment ils utilisent l'électricité pendant une période donnée. Bien entendu, ces systèmes ne permettent pas en soi d'améliorer la consommation d'énergie de l'utilisateur, mais ils ont 2 implications importantes qui permettent d'optimiser la consommation :

- La sensibilisation des utilisateurs à la consommation peut conduire à une plus grande attention et à des économies.

- La mise en place d'un système expert qui analyse ces données et les traite peut conduire à une gestion plus efficace de l'énergie et à des économies substantielles, sans changer les habitudes de consommation.

## 4. ANT

### 4.1 CONSIDÉRATIONS INITIALES

Avant d'entrer dans le bien-fondé du projet, il est bon d'apporter quelques précisions sur les problèmes que nous avons abordés dans les chapitres précédents et sur les solutions actuellement disponibles sur le marché.

Nous avons ensuite examiné les systèmes d'optimisation de la tension. Il en existe plusieurs types sur le marché, bien qu'en pratique il s'agisse de dispositifs qui réduisent simplement la tension du réseau, certains de manière statique, d'autres de manière dynamique, ces derniers incluant les stabilisateurs de tension. Il est clair que dans ce cas, un système d'optimisation de la tension pourrait être utile pour économiser de l'argent, mais il faut faire très attention à la manière dont il fonctionne. L'abaissement statique de la tension n'est certainement pas une solution efficace, car l'augmentation ou l'abaissement de la tension dépend normalement des conditions de charge. Bien entendu, dans ce cas, il faut également faire attention

à l'état de la ligne d'alimentation, qui peut créer des problèmes de fonctionnement ou endommager les charges elles-mêmes. Dans la pratique, une surtension ou une sous-tension stationnaire peut être positive ou négative pour un système selon qu'il s'agit de charges à puissance variable ou de charges à puissance constante (alimentées - non linéaires), pour lesquelles le mode de fonctionnement correct ne peut être prédit a priori.

Nous avons ensuite étudié les systèmes de correction et de filtrage du facteur de puissance. Là encore, de nombreux éclaircissements doivent être apportés en termes d'énergie et de sécurité des installations. En particulier, supposons que nous soyons confrontés au cas d'un système avec une charge inductive à prédominance ohmique et en présence d'une surtension stationnaire, dans ce cas, en fonction du facteur de puissance de la charge, il y aura une chute de tension d'une certaine valeur entre le générateur et la charge elle-même, cette chute de tension pourrait amener la charge à la valeur de tension nominale, l'introduction d'un système de correction et de filtrage du facteur de puissance apporte comme bénéfique une augmentation du facteur de puissance, donc une circulation de courant plus faible dans la branche série du circuit et donc une augmentation de la tension utile à la charge. Cette dernière se traduit très souvent par un gaspillage plus important d'énergie active en fonction du rapport entre l'impédance de la ligne et l'impédance de la charge. Il en va de même, comme nous avons pu le constater dans les simulations, en ce qui concerne la contribution

harmonique aux courants et tensions de ligne, dans ce cas accentuée et aggravée par le fait qu'en présence de perturbations harmoniques se pose également le problème de la sécurité des charges et de l'ensemble du système.

Le projet ANT est né de la nécessité de combiner les contributions positives des différentes technologies examinées en un seul produit. La véritable nouveauté et la valeur ajoutée la plus importante du produit résident précisément dans son approche dynamique de la gestion de la charge. En particulier, l'appareil est capable d'analyser instantanément le réseau électrique auquel il est connecté, tant en termes d'alimentation que de charge, et d'alimenter les charges de manière optimale dans n'importe quelle configuration de fonctionnement. L'appareil est capable d'analyser les paramètres du réseau avec une précision de 0,1 % sur les spectres de tension et de courant et, en analysant le niveau d'émission des charges, il est capable de comprendre la composition interne du réseau et d'interpréter par inférence la contribution des impédances individuelles, avec une référence particulière à la différence entre les impédances de charge et les impédances de transmission et parasites, de sorte que l'appareil est capable d'optimiser le transfert de puissance aux impédances de charge, en minimisant les pertes de transmission et les pertes parasites.

Le projet ANT a été créé pour répondre au besoin croissant d'optimiser le transfert d'énergie entre un générateur électrique et un réseau de charges qui lui sont connectées.

Dans ce contexte, nous entendons par optimisation une série de mesures visant à améliorer la qualité de l'énergie à l'entrée du système et à compenser les effets négatifs dus à l'insertion de charges, comme nous l'avons vu dans les simulations analysées.

Il convient de souligner qu'à l'heure actuelle, tel que le système est composé, il n'existe pas de solutions alternatives équivalentes, mais il existe des produits de substitution qui se rapprochent de la solution proposée.

## 4.2 PROJET ACTUEL / DESCRIPTION DU DISPOSITIF

Système d'adaptation de l'impédance des circuits électriques de consommation à l'impédance du générateur, permettant d'améliorer l'efficacité des installations, de protéger les appareils et d'économiser de l'énergie.

Une fois connecté au réseau électrique, l'appareil est capable d'analyser tous les paramètres de fonctionnement du réseau, qu'il s'agisse de la qualité de l'énergie externe ou des facteurs de perturbation internes. Il peut atténuer les perturbations et utiliser l'énergie pour optimiser la tension et les flux de courant internes. Il est également capable d'équilibrer le profil de charge sur les phases et les tensions d'alimentation, et donc d'équilibrer les 3 courants et les 3 courants de phase. Le profil de fonctionnement est entièrement configurable et peut également être géré à distance, tout comme les données issues de l'analyse du réseau. Le produit comprend la variante de base appelée ANT version 2.1, la variante TG qui inclut les fonctionnalités de gestion à distance de l'appareil, comme mieux spécifié

ci-dessus, et la variante TL qui inclut les fonctionnalités de lecture à distance comme mieux spécifié ci-dessus. Le dispositif doit être raccordé au système, qu'il soit domestique ou professionnel, en aval du compteur et de l'entrée de la ligne de distribution primaire. Une fois connecté au circuit, il est capable de calculer l'impédance perçue par le compteur par rapport au circuit et d'optimiser cette impédance afin d'améliorer le transfert d'énergie entre le compteur et le système, réduisant ainsi efficacement l'énergie dissipée par le système en raison de facteurs qui ne sont pas imputables à l'utilisation des dispositifs eux-mêmes. En outre, l'appareil agit également comme un optimiseur de la qualité de l'énergie par rapport à la ligne d'arrivée. La qualité de l'énergie est la caractéristique du réseau électrique qui permet de transférer efficacement l'énergie aux consommateurs et d'éliminer les déchets autant que possible.

### **Gestion à distance**

Le dispositif télécommandé comprend toutes les fonctionnalités de base avec la possibilité supplémentaire de contrôler à distance tous les appareils installés. La gestion à distance des appareils est très importante pour l'amélioration des paramètres de fonctionnement des appareils, car il est possible de reconfigurer à distance chaque appareil individuel en fonction de la situation de fonctionnement standard. En outre, grâce à la gestion à distance, il est possible d'avoir à tout moment, depuis son propre bureau, une image complète de la situation de fonctionnement

des appareils et, si nécessaire, de contourner chaque appareil en le déconnectant du système auquel il est connecté. En outre, il est possible d'être informé du type de dysfonctionnement qui s'est produit en cas de panne de l'appareil, et si une pièce est cassée à l'intérieur, il est possible de savoir à l'avance quelle pièce doit être remplacée et de fournir un service plus précis et plus efficace, avec naturellement la possibilité de contacter directement le client et de l'informer qu'il y a eu un dysfonctionnement et que le service est en cours d'exécution.

### **Suivi**

Le produit est évidemment équipé d'un réseau de capteurs internes qui vérifie le fonctionnement de tous les composants internes afin de surveiller tous les paramètres de fonctionnement de l'appareil. Il est donc en mesure de signaler immédiatement toute anomalie ou tout dysfonctionnement du système et d'indiquer au service d'assistance le problème rencontré et les solutions possibles à appliquer afin de résoudre rapidement le problème.

### **Logiciel**

D'un point de vue architectural, le produit télégeré consiste en un serveur central dédié qui communique avec tous les appareils de manière à ce que la situation et les paramètres de fonctionnement de tous les appareils connectés soient toujours clairs. En outre, l'entreprise a la possibilité d'accéder à un logiciel et de

vérifier l'état de tous les appareils à tout moment. Il est également possible, par le biais du même logiciel, de modifier la configuration de chaque appareil individuel et, si nécessaire, de le déconnecter du système, le tout de manière simple et rapide. Il est également possible de fournir un logiciel dédié à d'autres utilisateurs qui gèrent des zones individuelles, afin qu'ils puissent gérer tous les appareils de leur zone. Bien entendu, dans chaque cas, l'entreprise et le prestataire de services reçoivent des notifications concernant les éventuels dysfonctionnements des appareils, et éventuellement les tickets de service à traiter.

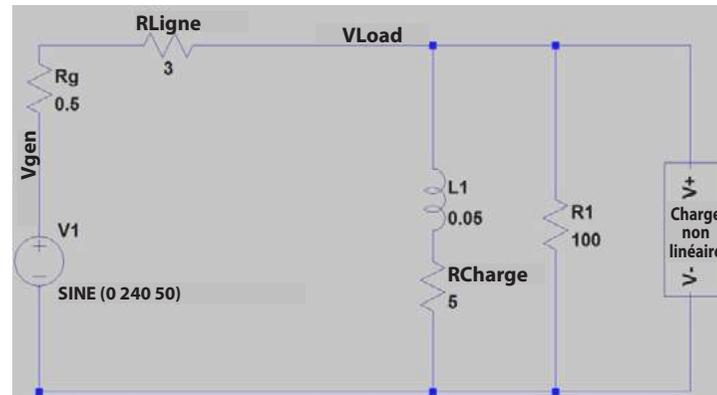
### **Lecture à distance**

Le produit téléporté comprend toutes les fonctionnalités du produit télégréé, avec la possibilité de disposer également de toutes les données de consommation de l'utilisateur, le tout sur une plateforme unique, simple et fonctionnelle. Les fonctionnalités de lecture à distance sont accessibles à l'entreprise, elles peuvent également, à la discrétion de l'entreprise, être mises à la disposition du réseau de services, mais surtout elles peuvent être mises à la disposition des utilisateurs individuels qui possèdent l'appareil. Les utilisateurs peuvent accéder facilement à leurs profils de consommation via le site web de l'entreprise et via les smartphones et les tablettes, grâce à une interface simple et intuitive. La grande nouveauté, c'est que grâce au système, il est possible de contrôler non seulement la consommation d'électricité, mais aussi la consommation d'eau et de gaz, et il est même possible de gérer les données de

production de tous les systèmes d'énergie renouvelable de la propriété, tels que les systèmes photovoltaïques, les mini-éoliennes, les systèmes solaires thermiques et autres.

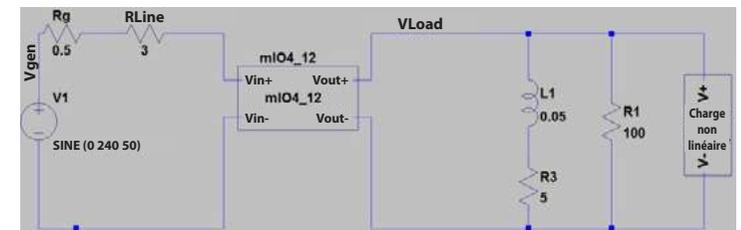
## 4.2 DONNÉES DE CONCEPTION ET SIMULATIONS

Voyons maintenant comment le système interagit avec le système électrique, en simulant une situation réelle, où sont présents des phénomènes de surtension stationnaire, de déphasage et la présence de charges non linéaires. Dans ce cas, comme on peut le voir sur le schéma, on ne tient pas compte de la non-linéarité de la ligne d'alimentation, c'est-à-dire qu'on ne tient pas compte des perturbations provenant de l'extérieur, mais seulement des perturbations générées dans la ligne interne :



Puissance fournie par le générateur : 1094 W

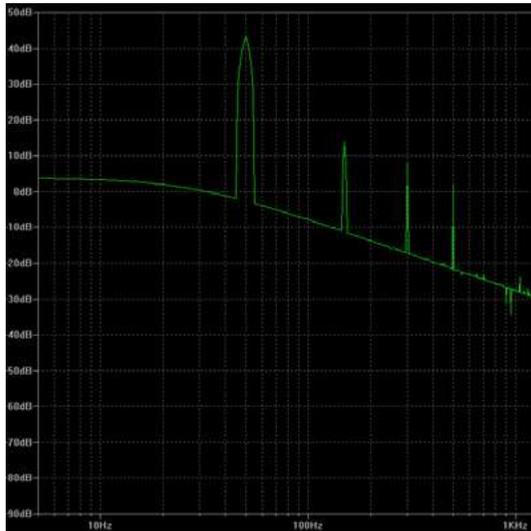
Puissance absorbée par la charge : 738 W



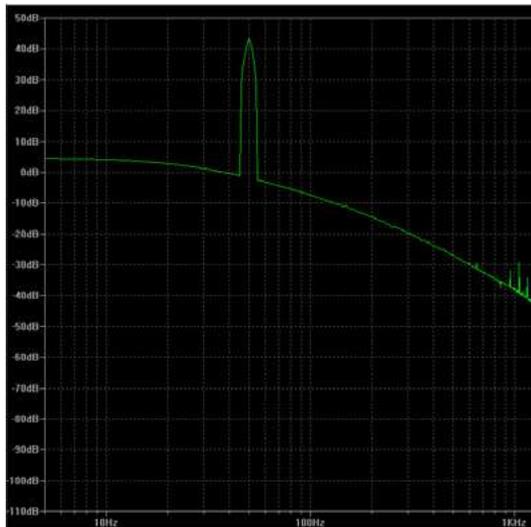
Puissance fournie par le générateur : 843 W

Puissance absorbée par la charge : 756 W

Analyse harmonique sur la tension d'alimentation des charges (VLoad) :

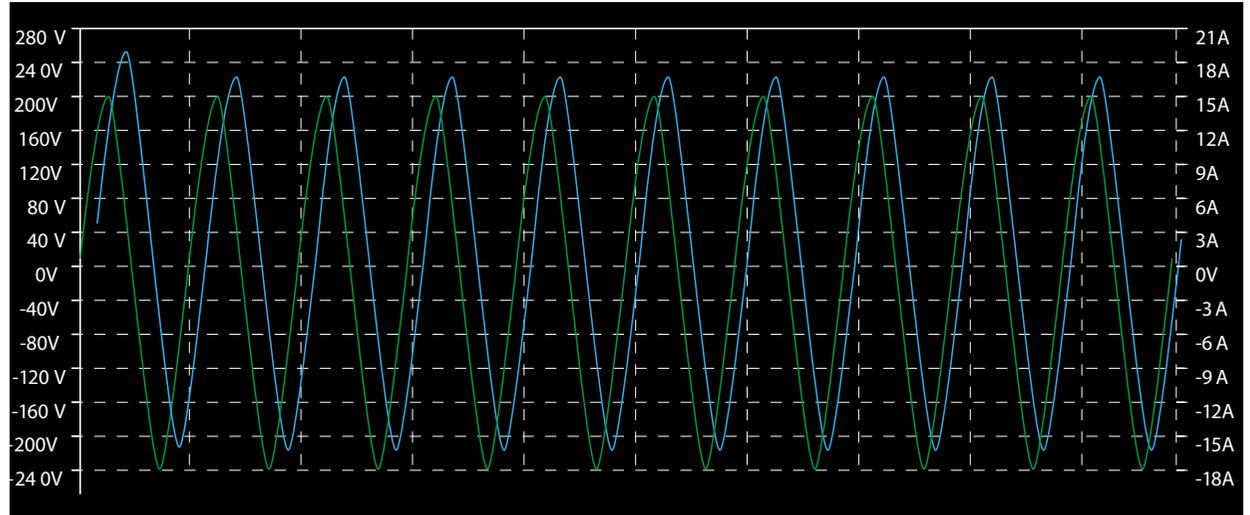


Distorsion harmonique totale : 3.479955 %

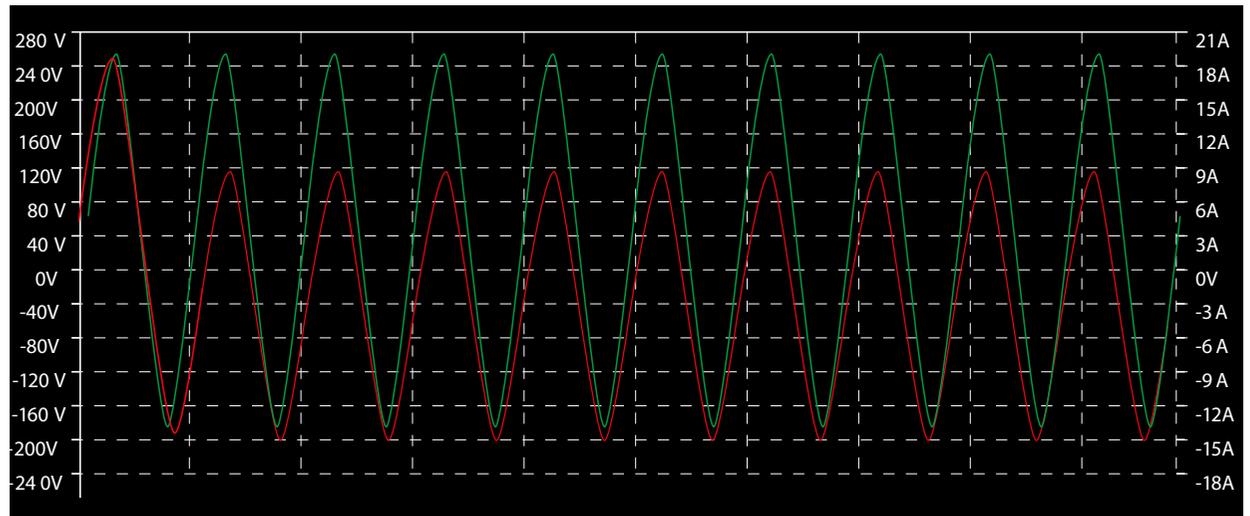


Distorsion harmonique totale : 3.479955 %

Les formes d'onde résultantes :  
Sans ANT :



Avec ANT



## Effets de la mise en place du projet ANT

	Sans ANT	Avec ANT
Tension d'alimentation :	240V	240V
Courant de ligne :	10A	5A
Facteur de puissance :	0.64	0.99
Distorsion harmonique totale :	3.5 %	0.01 %
Puissance active fournie par le générateur :	1094 W	843 W
Puissance active dissipée sur la charge :	738 W	756 W

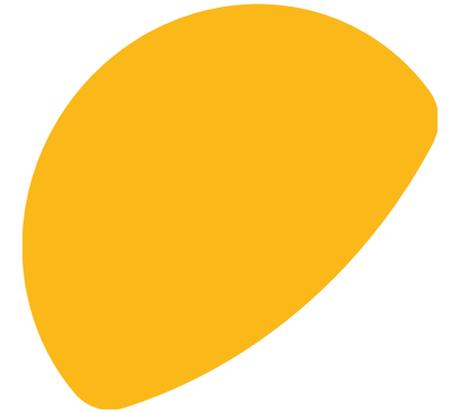
### CONSIDÉRATIONS

- La puissance active distribuée par le générateur sans le système est supérieure à 18 % ;
- L'efficacité de la charge est d'environ 3 % avec l'activation du système
- La distorsion harmonique totale de la tension sur la charge est négligeable lorsque l'appareil est en marche, sinon elle serait d'environ 3,5 %. Ainsi, la charge du système (50 Hz) est optimisée à plus de 3 %.
- Le facteur de puissance du circuit augmente considérablement et se rapproche de l'efficacité maximale autorisée.
- Le courant circulant est inférieur d'environ 50 % après la mise en marche du système et, par conséquent, les pertes sur le câble sont nettement inférieures.

» **Orthographié**  
**ESE, lire EASY,**  
**facile** comment  
économiser de  
l'énergie.



» Découvrez  
l'univers ESE  
et toutes les opportunités  
pour votre entreprise !





***Siège social***  
Corso Giuseppe Garibaldi 86  
20121 - Milan (MI) Italie

***Siège administratif***  
Via San Martino, 87  
Parco dei Ciliegi  
82016 Montesarchio (BN) Italie

+39 02 87.368.229  
+39 02 87.368.222

[info@ese.energy](mailto:info@ese.energy)

assistance technique  
[service@ese.energy](mailto:service@ese.energy)

Code fiscal et n° d'identification à la  
TVA : 08999150967  
R.E.A. : MI2061570

[www.ese.energy](http://www.ese.energy)    
*suivez-nous sur*



Scannez le code QR  
et découvrez **ESE.ENERGY**



*partenaire commercial*



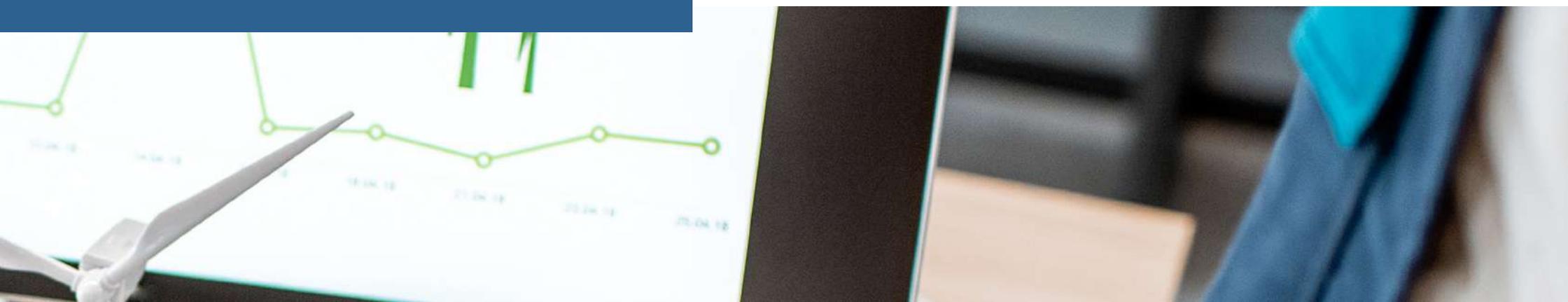
**IoT INDUSTRY 4.0 Ready**  
**MADE IN ITALY**

RAPPORT TECHNIQUE



# » SOMMAIRE /

<b>1. SITUATION ACTUELLE DES FOURNITURES</b> .....	<b>4</b>	<b>3. TECHNOLOGIES EXISTANTES</b> .....	<b>18</b>
1.1 LE PASSAGE À L'ÈRE NUMÉRIQUE .....	4	3.1 OPTIMISATION DE LA TENSION .....	18
1.2 LA PRODUCTION DISTRIBUÉE .....	5	3.2 REPHASAGE .....	18
1.3 SURTENSION OU SOUS-TENSION .....	6	3.3 FILTRAGE HARMONIQUE .....	19
1.4 DISTORSION HARMONIQUE .....	7	3.4 FILTRE EMI .....	20
1.5 ÉQUILIBRAGE DES PHASES .....	9	3.5 PROFILAGE DES CONSOMMATIONS .....	20
1.6 DÉPHASAGE .....	10	<b>4. ANT</b> .....	<b>21</b>
<b>2. RÉPONSE DES CHARGES</b> .....	<b>11</b>	4.1 CONSIDÉRATIONS INITIALES .....	21
2.1 AVANT-PROPOS .....	11	4.2 PROJET EN COURS .....	22
2.2 SURTENSION STATIONNAIRE SUR CHARGE OHMIQUE .....	12	4.3 DONNÉES DU PROJET ET SIMULATIONS .....	25
2.3 DÉPHASAGE .....	14		
2.4 DISTORSION HARMONIQUE .....	16		



## 1. SITUATION ACTUELLE DES FOURNITURES

Au cours des dernières années, nous avons assisté à 2 phénomènes très importants dans la distribution et l'utilisation de l'électricité au niveau mondial :

- Le passage à l'ère numérique
- La production distribuée

Ces 2 phénomènes ont un impact majeur sur la distribution de l'électricité et sa bonne gestion.

Analysons-les en détail.

### 1.1 LE PASSAGE À L'ÈRE NUMÉRIQUE

Il y a un peu plus d'une décennie, une véritable révolution a commencé dans tous les domaines, en raison de l'utilisation croissante des technologies numériques pour améliorer les performances des systèmes utilisés afin d'exécuter les fonctions technologiques les plus importantes. Les ordinateurs sont aujourd'hui utilisés de manière intensive dans toutes les structures et dans tous les domaines, de l'environnement domestique aux processus industriels les plus complexes. Aujourd'hui, toutes les machines couramment utilisées sont contrôlées et exploitées par des systèmes informatisés entièrement numériques. Mais ce n'est pas tout, des outils qui étaient encore inconcevables il y a quelques années (tablettes, smartphones, etc.) font leur apparition dans nos vies. Même des concepts de

base tels que l'éclairage passent de plus en plus aux technologies numériques, surtout grâce à l'avènement des LED. Nous examinerons plus loin les conséquences de ce phénomène sur les questions énergétiques et la gestion efficace de l'énergie. Pour l'instant, nous constatons que le développement de plus en plus massif des technologies numériques génère la présence de plus en plus importante de charges non linéaires connectées à nos installations.



## 1.2 LA PRODUCTION DISTRIBUÉE

Ces dernières années, surtout en Europe, mais dans le monde entier, la production d'électricité a profondément changé jusqu'à il y a vingt ans, la production d'électricité était considérablement centralisée, surtout grâce à l'exploitation de l'énergie atomique, qui lui a donné le pouvoir. possibilité de créer de grandes centrales électriques pour desservir une base d'utilisateurs de plus en plus nombreuse et énergivore. Toutefois, ces dernières années, la production d'électricité a également connu une révolution remarquable, principalement grâce à l'énergie photovoltaïque, qui, en partie grâce à des politiques d'incitation fortes, s'est de plus en plus imposée dans nos vies, mais aussi grâce à d'autres technologies telles que l'énergie éolienne, l'hydroélectricité, la cogénération, etc. connaissent un développement croissant.

La manière dont ce phénomène affectera la transmission de l'énergie aux utilisateurs finaux dépasse le cadre de cette discussion, mais il peut certainement être intéressant d'évaluer d'abord les principales différences entre les deux approches. Afin de simplifier la discussion, nous esquissons ci-dessous la situation du réseau de transmission de l'énergie électrique dans les deux cas afin d'évaluer qualitativement l'impact de ce changement sur l'utilisateur final :

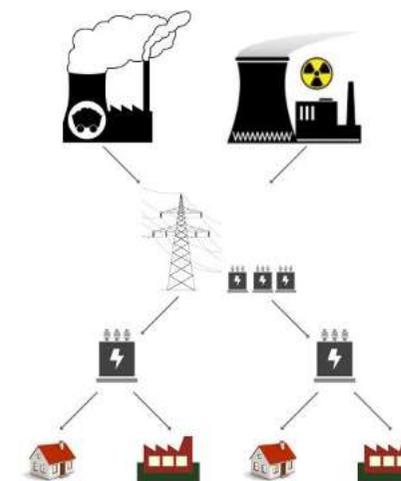


Figure 1 : Réseau de transmission à production centralisée

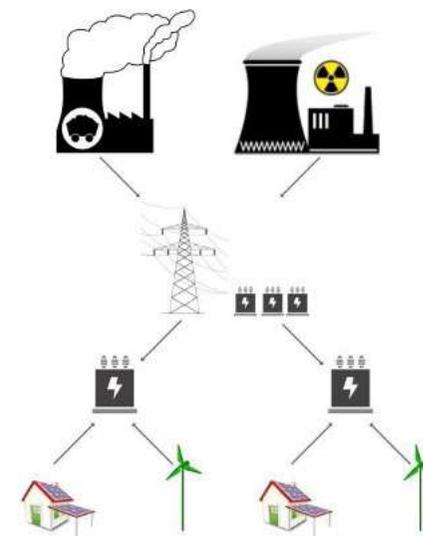


Figure 2 : Réseau de transmission à production décentralisée

Comme le montrent les 2 figures ci-dessus, la différence la plus importante que nous pouvons détecter est d'ordre topologique. En particulier, dans le cas de la production distribuée, l'électricité injectée dans le réseau passe toujours par des systèmes de distribution centraux avant d'arriver aux utilisateurs finaux, alors que dans le cas de la production centralisée, ce n'est pas toujours le cas ; l'électricité peut en somme être échangée directement du générateur à l'utilisateur sans passer par des systèmes de distribution centralisés

Ce phénomène a un impact significatif sur la qualité de l'énergie fournie par les générateurs, puisqu'il n'y a pas d'étapes intermédiaires pour l'équipement de distribution, l'énergie fournie par les générateurs distribués est moins efficace que celle fournie par les générateurs centralisés. Ces dernières années, dans le domaine de l'électricité et de l'électrotechnique, on entend de plus en plus parler de la qualité de l'énergie, c'est-à-dire de la qualité de l'énergie transmise des lignes électriques aux consommateurs.

### 1.3 SURTENSION OU SOUS-TENSION

La surtension est un phénomène par lequel le réseau transfère l'énergie à une tension supérieure à la tension nominale. Le phénomène peut être transitoire ou stationnaire. Dans le premier cas, l'écart par rapport à la valeur nominale se produit pendant quelques instants ou quelques cycles, avec des amplitudes de quelques volts à des centaines de volts, souvent dues à la commutation de charges inductives, de transformateurs

sous charge, etc..., bien sûr, ce type de perturbation peut également générer des inefficacités énergétiques, mais le véritable problème associé à ce type de perturbation est le risque d'endommager les appareils connectés au système. Dans le second cas, la perturbation peut être considérée comme stationnaire lorsque la tension d'alimentation est constamment supérieure à la tension nominale de fonctionnement qui, en Italie, est de 230 V pour les systèmes monophasés à basse tension et de 400 V pour les systèmes triphasés à basse tension. Même dans ce cas, la perturbation pourrait, à long terme, endommager les appareils connectés au système, bien que ce phénomène soit lié à la conception des appareils eux-mêmes, qui devraient avoir une tolérance de tension d'entrée de  $\pm 10\%$  mais le vrai problème est en revanche lié dans de nombreux cas à l'efficacité énergétique qui en résulte. En particulier, pour la plupart des charges linéaires connectées aux réseaux, une augmentation de la tension entraîne une réduction de la durée de vie des appareils et une augmentation de la consommation d'énergie sans amélioration notable des performances.

## 1.4 DISTORSION HARMONIQUE

La transmission de l'énergie sur le réseau électrique doit se faire au moyen d'une onde sinusoïdale à une fréquence de 50 Hz (en Italie) avec une tension nominale de 230 V, et cette onde se fermant sur des impédances linéaires doit générer un courant dans le circuit électrique, également sinusoïdal à une fréquence de 50 Hz, avec une amplitude dépendant de la partie ohmique de l'impédance et au maximum un déphasage par rapport à l'onde de tension dépendant de la partie imaginaire de l'impédance elle-même. Nous avons utilisé le terme « devrait » en référence à la fois à la tension d'entrée et à la génération de courant de ligne, car dans le premier cas, il n'est pas certain que l'onde de tension soit parfaitement sinusoïdale à l'entrée, mais même si elle l'est, il n'est pas certain que l'onde de courant résultante soit parfaitement sinusoïdale. D'un point de vue mathématique, l'onde en question est de toute façon périodique et peut donc être développée en série de Fourier, en la représentant comme la somme d'une infinité de composantes sinusoïdales de fréquence, d'amplitude et de phase différentes. Techniquement, les différentes composantes du développement en série sont appelées harmoniques ; en particulier, l'onde sinusoïdale à la fréquence fondamentale est également une harmonique.

Si l'on considère un circuit électrique alimenté par une onde sinusoïdale pure et fermé uniquement sur des charges linéaires, comme nous venons de le mentionner, l'onde de courant résultante aura une seule

composante à la fréquence de l'alimentation et n'aura pas de composante harmonique à une fréquence autre que la fondamentale, alors que dans le cas où au moins une des charges est non linéaire, des harmoniques de courant à une fréquence autre que la fondamentale peuvent se produire, en négligeant le phénomène des inter-harmoniques pour le moment, pour les charges électriques, les composantes de courant résultantes ayant une plus grande contribution sont généralement celles à des fréquences multiples de la fondamentale, par conséquent les harmoniques produites peuvent être ordonnées numériquement en se référant au multiple de la fréquence d'intérêt, c'est-à-dire par exemple une deuxième harmonique est une harmonique à deux fois la fréquence de la fondamentale. En outre, pour la plupart des charges non linéaires connectées aux réseaux (par exemple, les alimentations à découpage), les harmoniques ayant l'amplitude la plus élevée sont celles d'ordre impair, la troisième, la cinquième, la septième, etc. De plus, dans les cas réels, les harmoniques ont généralement une contribution d'amplitude plus importante dans les nombres ordinaux inférieurs et sont donc décroissantes, c'est-à-dire qu'en général, la troisième harmonique a une amplitude plus importante que la cinquième, la cinquième que la septième, et ainsi de suite. Bien entendu, même dans ce cas, les situations individuelles doivent être analysées car différentes charges non linéaires connectées au réseau en question peuvent générer une contribution harmonique différente l'une de l'autre, et donc la somme de ces contributions peut être différente.

En se référant à l'onde de courant générée, il est possible de définir la distorsion harmonique totale comme suit :

$$THD_i = \frac{I_t - I_f}{I_f} = \frac{\sum_2^{\infty} I_n - I_f}{I_f}$$

où :

$I_t$  est le courant total

$I_f$  est le courant à la fréquence fondamentale

Il en va de même pour l'onde de tension :

$$THD_v = \frac{V_t - V_f}{V_f} = \frac{\sum_2^{\infty} V_n - V_f}{V_f}$$

Et plus généralement pour la puissance transmise :

$$THD_p = \frac{P_t - P_f}{P_f}$$

Cet indice nous renseigne, comme son nom l'indique, sur la distorsion globale présente dans les formes d'onde. Naturellement, plus la valeur est supérieure à 0, plus la forme d'onde s'éloigne du cas idéal. La présence de distorsions harmoniques en soi crée également des problèmes énergétiques dans les installations. Il est en effet possible de démontrer que la distorsion du courant a également un effet sur la forme d'onde de la tension alimentant les charges, et donc que ce phénomène a également des conséquences sur les charges linéaires

connectées aux systèmes, et qu'il génère d'autres pertes dans le système en raison de l'augmentation de la dissipation de puissance sur l'impédance de la ligne et l'impédance interne du générateur.

En général, une charge linéaire a une largeur de bande passante presque infinie, par exemple une ampoule à incandescence transforme toute l'énergie électrique qu'elle fournit en énergie thermique, ce qui signifie que par exemple l'ampoule est alimentée avec 5V à une fréquence de 400 Hz, le filament de l'ampoule va chauffer et de la chaleur sera générée par l'effet Joule.

Le problème est que la transformation en question ne génère pas d'émissions lumineuses dans la bande visible, ou plutôt elle génère une quantité minimale d'émissions lumineuses dans la bande visible et peut-être d'autres émissions dans des bandes lumineuses non visibles à l'œil nu, par exemple l'ultraviolet ou l'infrarouge, parce que le filament est conçu pour fonctionner à la fréquence du réseau.

Cela a 3 implications très importantes :

- Un fonctionnement en dehors des paramètres nominaux peut entraîner une défaillance prématurée de l'appareil.
- L'énergie lumineuse délivrée a une composante indésirable, de sorte que l'on peut dire que l'énergie excédentaire n'est pas utilisée pour effectuer le travail pour lequel l'appareil est conçu, mais qu'elle n'est en fait qu'une perturbation.
- L'émission de rayonnements en dehors de la lumière visible peut être nocive pour le corps humain qui y est exposé.

Si l'on considère d'autres types de charges comme les moteurs électriques, les pompes ou autres, les conséquences pourraient être encore plus graves.

Le résultat général est que ces distorsions transfèrent de l'énergie aux charges, qui l'utilisent en partie pour effectuer le travail pour lequel elles ont été conçues et en partie pour générer des inefficacités qui augmentent la possibilité de défaillance de la charge. Ainsi, outre le préjudice économique résultant de l'augmentation de la consommation d'énergie, il y a également le préjudice lié à la réduction de la durée de vie utile des appareils eux-mêmes.

## 1.5 ÉQUILIBRAGE DES PHASES

Dans le cas des systèmes triphasés, un autre facteur qui contribue négativement à la qualité de l'alimentation est le déséquilibre entre les phases, c'est-à-dire la différence entre les formes d'onde sur les phases individuelles de l'alimentation, ces différences peuvent en général être attribuables à la tension à la fréquence fondamentale ou aux harmoniques. Ces perturbations se produisent généralement lorsque des charges monophasées et des charges triphasées sont mélangées sur la même ligne. Là encore, ce phénomène a des conséquences énergétiques sur les charges triphasées connectées, ainsi que des conséquences en termes d'efficacité et de durée de vie des appareils. La littérature dans ce domaine nous apprend que la plupart des inefficacités sont générées par les moteurs triphasés connectés au système.

## 1.6 DÉPHASAGE

Une autre perturbation importante qui se produit dans les charges connectées à un réseau électrique est le déphasage entre la forme d'onde de la tension et la forme d'onde du courant généré. Le déphasage entre la tension et le courant en général ne génère pas en soi de problèmes énergétiques sur les charges, ou du moins ne génère pas de problèmes en termes d'énergie active absorbée par les charges, bien sûr la présence de déphasage génère des inefficacités et un plus grand engagement de puissance dans la phase de transmission de l'énergie. En général, même une charge linéaire, qui n'est pas complètement ohmique, génère un déphasage du courant par rapport à la tension d'alimentation, soit en avance, soit en retard, selon que la charge en question est ohmique-capacitive ou ohmique-inductive. Cela génère la transmission de la puissance dite réactive, en particulier la puissance réactive est une puissance qui n'est pas utilisée par les charges pour effectuer un travail mais simplement pour supporter le champ magnétique. Le problème, c'est que la puissance réactive est transmise par un courant inductif, ce qui augmente la charge sur les câbles électriques connectés au réseau, et en outre, une plus grande circulation de courant dans le circuit génère des pertes plus importantes sur les impédances en série du circuit lui-même, en particulier sur l'impédance interne du générateur et sur l'impédance de la ligne, générant ainsi des pertes ohmiques (donc de la puissance active) sur le système lui-même.

Ici, 2 facteurs sont importants pour l'équilibre énergétique et économique du système :

- Dans certains cas, l'utilisation de l'énergie réactive génère un coût pour l'utilisateur en termes de pénalités sur la facture.
- Le courant réactif circulant génère une dissipation d'énergie active sur la ligne.

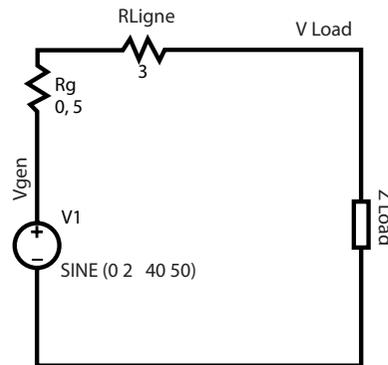
De plus, il est facile de démontrer que ce facteur a également des conséquences sur la tension d'alimentation des charges, car la chute de tension sur la ligne génère une tension utile plus faible sur la charge elle-même pour la même puissance totale absorbée, en d'autres termes, le transport de l'énergie devient très inefficace.

Très souvent, lorsqu'il est question de réseaux électriques, il est d'usage de parler du facteur de puissance, c'est-à-dire du rapport entre la puissance totale transmise (puissance apparente) et la puissance active, et ce facteur est généralement confondu avec ce que l'on appelle le coût. En particulier, cette dernière affirmation n'est vraie que si l'on considère uniquement des charges linéaires, de sorte que pour un réseau de charges linéaires, le coût correspond au facteur de puissance. En général, le facteur de puissance tient également compte de la distorsion harmonique totale.

## 2. RÉPONSE DES CHARGES

### 2.1 AVANT-PROPOS

Dans cette section, nous analyserons, également à l'aide de simulations, le comportement des charges en présence des perturbations susmentionnées. Pour simplifier, prenons l'exemple d'un circuit électrique de type domestique, d'une puissance contractuelle de 3 kW, qui peut être schématisé comme suit : C'est un modèle à paramètres concentrés qui sera utilisé pour les simulations.



*En particulier :*

- $R_g$  est la résistance « interne » du générateur
- $R_{Ligne}$  est la résistance de ligne du réseau, principalement due à la présence de câbles électriques pour la distribution de l'énergie. Pour des raisons de simplicité, les effets capacitifs et

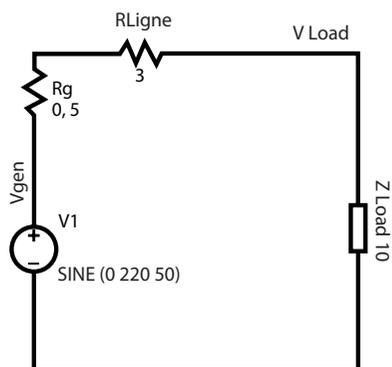
inductifs de l'impédance elle-même seront négligés ; la valeur résistive fixée à 3 Ohm correspond à environ 350 m de câble d'une section moyenne de 2 mm<sup>2</sup>.

- $Z_{Load}$  est l'impédance de charge, schématisée comme l'impédance équivalente vue du générateur. Le circuit considéré peut être divisé en deux sections, l'une étant la partie alimentation et l'autre la partie charges.

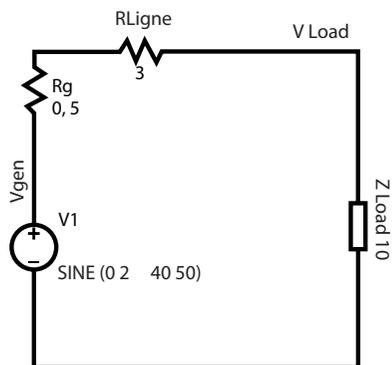
Pour évaluer le bilan énergétique du circuit lui-même, nous prendrons en compte un certain nombre de facteurs qui seront utiles de temps à autre, mais en général nous nous concentrerons sur la puissance active fournie par le générateur et la puissance active absorbée par la charge, de sorte que nous puissions évaluer l'efficacité du transfert de puissance dans différentes situations.

## 2.2 SURTENSION STATIONNAIRE SUR CHARGE OHMIQUE

Considérons comme premier exemple la présence d'une charge purement ohmique et analysons les effets d'une tension d'alimentation supérieure à la tension optimale sur le système, nous supposons une tension optimale de 220V :



Puissance active fournie par le générateur : 1785 W  
 Puissance active absorbée par la charge : 1322 W



Puissance active fournie par le générateur : 2124 W  
 Puissance active absorbée par la charge : 1573 W

Pour résumer :

CHARGE OHMIQUE – EFFETS DES VARIATIONS DE TENSION STATIONNAIRES		
	Tension de secteur optimale	Tension de secteur élevée
Tension d'alimentation :	220 V	240V
Courant de ligne :	16.28A	17.73A
Facteur de puissance :	≈ 1	≈ 1
Distorsion harmonique totale :	0 %	0 %
Impédance résistive de la charge :	10 Ohm	10 Ohm
Puissance fournie par le générateur :	1785 W	2124 W
Puissance dissipée sur la charge :	1322 W	1573 W

## Considérations

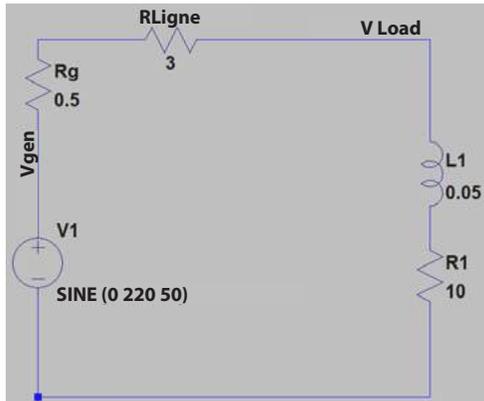
La première considération à faire est que dans le cas présent, la puissance totale engagée par le générateur est inférieure d'environ 16 % dans le cas d'une alimentation optimale. Naturellement, en raison de la linéarité du circuit, la puissance distribuée à la charge est également inférieure de 16 %, mais comme nous l'avons vu en traitant des effets des hautes tensions sur les charges, cela ne se traduit pas toujours par une augmentation de l'efficacité de la charge en question, par exemple s'il s'agit d'une ou plusieurs lampes à incandescence connectées en parallèle, il est certain qu'en les alimentant avec une tension plus élevée à la fréquence fondamentale, on obtiendra une énergie lumineuse plus élevée dans la bande visible, mais on obtiendra également une énergie plus élevée dans les autres bandes d'émission du luminaire, de sorte que la puissance lumineuse globale dans la bande visible ne sera pas augmentée de 16 %, mais d'un pourcentage plus faible. De plus, sortir de la plage de tension optimale pour le luminaire en question revient à raccourcir sa durée de vie de bien plus que 16 % ; des études de la société Omran, dans le cas des lampes à incandescence, montrent qu'alimenter une ampoule à 240V diminue sa durée de vie de 55 % par rapport à l'alimenter à sa tension nominale de fonctionnement.

Un autre facteur à prendre en compte est la perte d'énergie ohmique à travers le réseau, dans le cas de l'alimentation optimale nous avons une perte de  $(1785 - 1322)W = 463W$ , tandis que dans le cas de l'alimentation à plus haute tension nous avons  $(2124 - 1173)W = 551W$ ,

encore une fois, d'un point de vue relatif, le pourcentage de perte est le même, mais en valeur absolue, la perte de puissance est plus importante dans le cas de l'alimentation à plus haute tension, car nous avons environ 100 W de plus dissipés sur la ligne, ce qui signifie plus d'énergie comptabilisée au compteur, et plus de chauffage et d'inefficacité des câbles électriques.

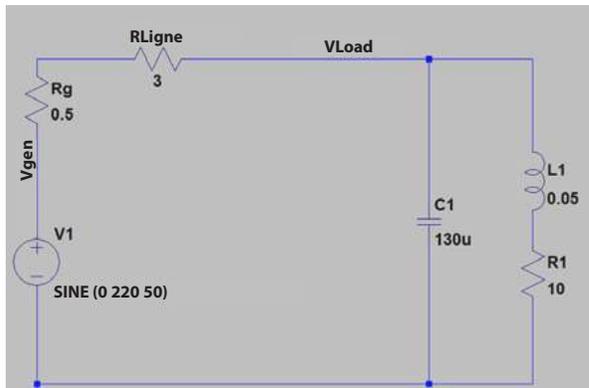
## 2.3 DÉPHASAGE

Considérons maintenant la présence d'une charge ohmique inductive dans le circuit :



Puissance fournie par le générateur : 632 W  
Puissance absorbée par la charge : 561 W

Nous introduisons en parallèle à la charge une impédance capacitive afin d'obtenir à partir du même circuit une impédance ohmique équivalente vue du générateur :



Puissance fournie par le générateur : 758 W  
Puissance absorbée par la charge : 573 W

Pour résumer :

### CHARGE OHMIQUE – EFFETS DES VARIATIONS DE TENSION STATIONNAIRES

	Charge équivalente ohmique	Charge équivalente ohmique-inductive
Tension d'alimentation :	220 V	220 V
Courant de ligne :	5.73A	8.03A
Facteur de puissance :	0.99	0.66
Distorsion harmonique totale :	0 %	0 %
Puissance fournie par le générateur :	758 W	632 W
Puissance dissipée sur la charge :	561 W	573 W

## Considérations

Pour le cas présent, nous pouvons noter 2 considérations importantes :

1. La puissance délivrée par le générateur dans le cas d'une charge ohmique inductive est environ 18 % plus élevée que dans le cas de son équivalent ohmique.
2. La puissance réellement utilisée par la charge est supérieure d'environ 3 %.

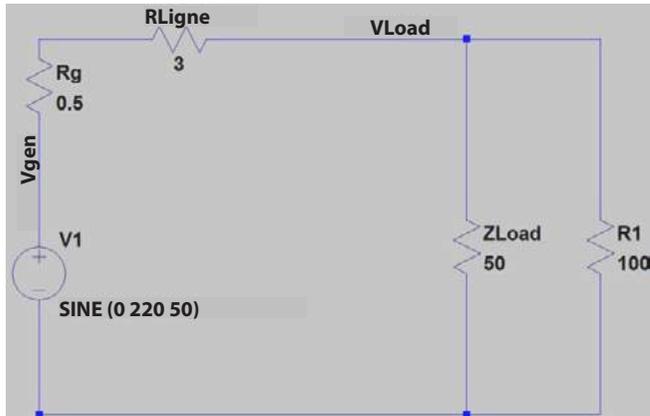
La première affirmation nous permet de dire qu'en améliorant le facteur de puissance du circuit, nous obtenons également une économie significative sur la puissance globale utilisée, de sorte que le bilan énergétique est positif dans ce cas, et nous constatons également que la charge elle-même en bénéficie puisque la puissance qu'elle utilise dans les mêmes conditions est légèrement plus élevée que dans le cas précédent.

Naturellement cette condition est vérifiée avec une tension d'alimentation de 220V, pour des tensions supérieures le problème est plus articulé, car l'insertion de charges inductives génère un déphasage avec une conséquente chute de tension sur la charge due à l'effet de l'impédance de la ligne, naturellement en effectuant le rephasage du système, la situation s'améliore d'un point de vue énergétique, de la même manière que nous venons d'analyser, mais en réalité nous nous retrouvons dans la condition précédente de surtension stationnaire

de la charge, donc la dissipation sur la charge doit de toute façon être remodelée afin de la faire fonctionner dans ses conditions optimales de fonctionnement, ce dernier facteur génère des économies encore plus importantes et est donc un élément souhaitable, que nous traiterons plus tard.

## 2.4 DISTORSION HARMONIQUE

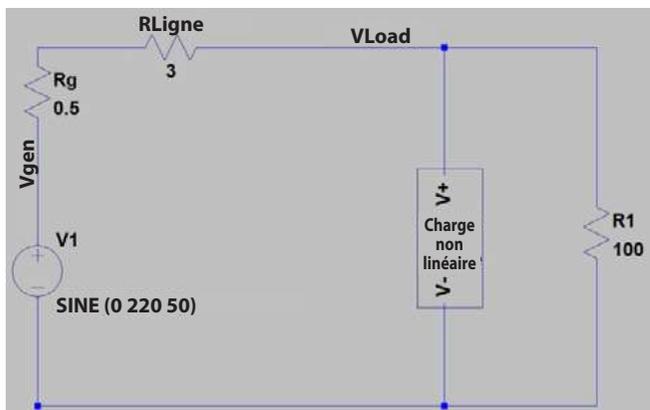
Considérons maintenant la présence de charges mixtes linéaires et non linéaires dans le circuit :



Puissance fournie par le générateur : 654 W

Puissance absorbée par la charge : 592 W

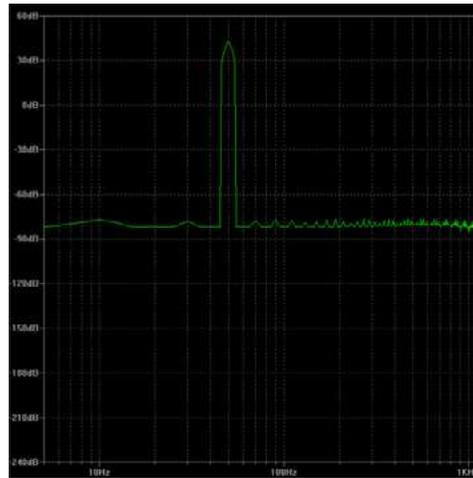
Nous remplaçons la charge de 50 ohms par une charge de même puissance mais non linéaire :



Puissance fournie par le générateur : 656 W

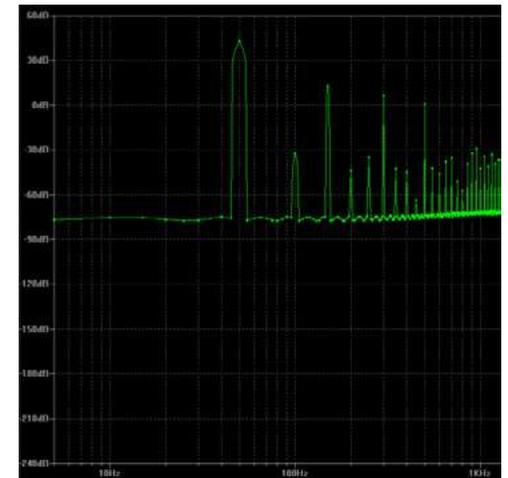
Puissance absorbée par la charge : 586 W

Examinons cette situation en détail, en considérant la transformée de Fourier de la tension sur la charge dans la bande 0 - 1kHz.



Circuit entièrement linéaire.

Distorsion harmonique totale : 0.000473 %



Circuit avec charge non linéaire

Distorsion harmonique totale : 3.550619 %

Pour résumer :

CHARGE OHMIQUE INDUCTIVE – EFFETS HARMONIQUES		
	Charge équivalente ohmique	Charge équivalente ohmique-inductive
Tension d'alimentation :	220 V	220 V
Courant de ligne :	4.21A	4.46A
Facteur de puissance :	≈ 1	0.95
Distorsion harmonique totale :	≈ 0 %	3.55 %
Puissance fournie par le générateur:	654 W	656 W
Puissance dissipée sur la charge :	592 W	586 W

### Considérations

Dans le cas présent, 3 considérations peuvent être notées :

- La puissance de sortie du générateur dans le cas d'un circuit non linéaire est environ 0,4 % plus élevée que dans le cas de son équivalent ohmique.
- La puissance totale transmise à la charge est supérieure d'environ 1 %.
- La puissance transmise à la charge à une fréquence de 50 Hz est inférieure de 3,5 %, ce pourcentage étant transmis hors bande.

Dans ce cas, la charge non linéaire génère une circulation de courant avec un contenu harmonique hors bande élevé ; ce courant en lui-même ne génère pas de problèmes pour les autres charges puisqu'il

circule uniquement entre le générateur et la charge concernée. Le problème est que la variation de tension sur l'impédance de la ligne a également un contenu harmonique élevé, et donc la tension d'alimentation globale des charges est affectée par des distorsions harmoniques qui dépendent, comme mentionné, de la puissance de la charge déformante et de l'impédance de la ligne, naturellement ces distorsions sont absorbées par les charges ohmiques et transformées en chaleur, sans vraisemblablement aucun avantage en termes d'efficacité, et même avec des inconvénients parfois substantiels en ce qui concerne la durée de vie de l'appareil. Nous pouvons donc affirmer que, si du point de vue du bilan énergétique, il ne semble pas y avoir de grandes variations (1 %), du point de vue de l'efficacité des charges, il y a des variations plus importantes (3-4 %), de sorte que la puissance totale absorbée par la charge est pratiquement inférieure de 5 % si l'on considère la puissance utile pour le travail (celle fournie à 50 Hz).

## 3 TECHNOLOGIES EXISTANTES

### 3.1 OPTIMISATION DE LA TENSION

L'optimisation de la tension est une technique d'économie d'énergie qui consiste à installer un transformateur en série avec la ligne d'alimentation afin de diminuer ou d'augmenter la tension disponible pour la charge.

L'optimisation peut se faire de manière statique ou dynamique, selon que la tension est diminuée de manière fixe d'un certain pourcentage ou qu'elle varie de manière dynamique pendant le fonctionnement normal du circuit.

Normalement, il y a une économie d'énergie, comme nous avons eu l'occasion de l'apprécier dans les simulations précédentes, en présence de charges à prédominance ohmique avec des problèmes de surtension stationnaires, ou en tout cas linéaires, dans le cas de charges non linéaires particulières (telles que comme les alimentations à découpage par exemple) la réduction de tension peut même conduire à des augmentations de consommation, en effet, ces charges fonctionnent à puissance constante, c'est à dire qu'elles absorbent toujours la même quantité d'énergie même face aux variations de tension, donc une tension décroissante cette variation entraîne une augmentation du courant dans le nœud, et donc dans la ligne, ce courant augmente naturellement les pertes sur les câbles de transmission.

### 3.2 REPHASAGE

Le rephasage est toute mesure utilisée pour augmenter (ou, comme on le dit couramment, améliorer) le facteur de puissance ( $\cos \phi$ ) d'une charge donnée, afin de réduire la valeur du courant circulant dans le système avec la même puissance active absorbée. Le but du rephasage est avant tout de diminuer les pertes d'énergie et de réduire l'absorption de puissance apparente en fonction des machines et des lignes existantes sur un site industriel. Le rephasage des installations a pris de l'importance lorsque le distributeur d'électricité a imposé des clauses contractuelles par le biais des mesures tarifaires de la CIP (n° 12/1984 et n° 26/1989) obligeant l'utilisateur à rephaser son installation sous peine de pénalités à payer. Dans les circuits avec des consommateurs particuliers tels que les lampes à filament, les chauffe-eau, certains types de fours, la puissance apparente absorbée est toute la puissance active. Dans les circuits avec des utilisateurs qui ont des enroulements à l'intérieur, comme les moteurs, les soudeurs, les ballasts pour lampes fluorescentes, les transformateurs, une partie de la puissance apparente absorbée est utilisée pour exciter les circuits magnétiques et n'est donc pas utilisée comme puissance active, mais comme puissance généralement appelée puissance réactive. Du point de vue du bilan énergétique global, la correction du facteur de puissance diminue la quantité d'énergie réactive absorbée par le circuit, mais ne diminue pas directement l'énergie active utilisée, c'est-à-dire que la diminution de l'énergie active est

généralement une conséquence du fait que les pertes sur les conducteurs diminuent puisque l'impédance série des conducteurs eux-mêmes est traversée par un courant global plus faible, mais en réalité toute cette énergie active n'est pas économisée, car la dissipation plus faible sur les conducteurs entraîne une chute de tension plus faible sur la charge, et dans le cas de charges ohmiques, cela signifie une plus grande dissipation d'énergie.

Il est clair, cependant, que dans ce cas, l'énergie excédentaire est positive pour la charge, à moins que nous ne soyons dans le cas de surtensions stationnaires. Le rephasage des charges peut être centralisé, distribué ou mixte ; dans le premier cas, l'ensemble du système est rephasé en amont de la charge et en aval du générateur ; par conséquent, à la sortie du générateur, le coût s'améliore, mais il n'y a pas nécessairement d'amélioration dans chaque maillon du circuit ; dans le deuxième cas, les charges sont rephasées individuellement, et l'effet est une amélioration du coût global en aval du générateur ; dans le troisième cas, il existe une solution mixte entre les deux premières. Normalement, le rephasage des charges est obtenu en plaçant un générateur de puissance réactive en parallèle avec les charges elles-mêmes, en contre-phase de la puissance réactive de la charge, de sorte que la puissance réactive de sortie est annulée. Le générateur le plus simple de puissance réactive dans les circuits sinusoïdaux est le condensateur, de sorte qu'un ou plusieurs condensateurs sont insérés en parallèle

avec les charges afin d'obtenir une amélioration des coûts. Il existe cependant d'autres techniques telles que les compensateurs statiques ou les filtres actifs.

### 3.3 FILTRAGE HARMONIQUE

Le filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques se fait normalement en insérant des dispositifs dans le circuit pour diminuer la distorsion harmonique totale normalement dans le courant, afin d'améliorer également les effets de distorsion sur la tension. Il existe 2 grandes catégories de filtres adaptés à cet usage :

- **Filtres passifs**
- **Filtres actifs**

Dans le premier cas, il existe une distinction supplémentaire entre les filtres accordés et les filtres inductifs. Les filtres accordés sont des filtres RLC particuliers accordés sur une fréquence spécifique et généralement connectés à la terre. Dans certains cas, des filtres passe-bande ou passe-haut peuvent également être utilisés afin de créer un chemin à faible impédance vers la terre pour les perturbations à ces fréquences et d'éliminer les perturbations à l'origine. Dans le cas des inductances de ligne, par contre, le principe est celui des filtres passe-bas LR, en effet l'inductance de ligne forme avec le circuit ohmique en aval un filtre passe-bas qui ne laisse pas passer la puissance à des fréquences loin de 50 Hz. Ce type de solution améliore bien sûr la situation à la charge en atténuant le facteur de distorsion harmonique totale, mais du point de vue

du bilan énergétique

la situation reste inchangée ; en effet, les perturbations sont acheminées vers la terre après avoir traversé le compteur, et l'énergie détournée vers la terre est donc toujours comptabilisée. Les filtres actifs sont, du point de vue de la charge, des générateurs de courant parallèles qui injectent un courant égal et opposé à celui de la charge déformante hors bande et annulent ainsi les courants harmoniques générés par les charges elles-mêmes.

Ils travaillent en modulant la tension de ligne, analysent la situation du réseau et injectent les courants de compensation. Naturellement, pour injecter correctement ces courants, ils nécessitent des fréquences de commutation très élevées, supérieures au double de la fréquence harmonique maximale, ils ont donc besoin. Dispositifs internes particulièrement efficaces et rapides, les IGBT sont généralement utilisés pour pouvoir travailler à la fréquence de commutation souhaitée. Cela rend naturellement ces dispositifs particulièrement onéreux. En outre, du point de vue du bilan énergétique, la situation est similaire à celle des filtres passifs, en ce sens qu'en fonction de l'efficacité des filtres  $i$ , une quantité équivalente d'énergie est absorbée pour compenser les perturbations. Ce qui est intéressant, c'est que les filtres actifs peuvent également améliorer les coûts du système car ils fonctionnent également comme des générateurs de puissance réactive. En outre, un autre aspect très intéressant est que des filtres de capacités différentes peuvent être insérés en parallèle sans perturber le circuit ni risquer la résonance.

### 3.4 FILTRE EMI

Le filtre EMI est un filtre passif que l'on trouve dans la plupart des équipements électroniques et qui permet à ces derniers de se conformer aux réglementations en matière de compatibilité électromagnétique, en particulier celles qui concernent les émissions conduites. Le filtre EMI est en somme un filtre passe-bas qui est connecté comme dernier étage entre l'équipement et l'alimentation, afin d'atténuer les composants de bruit que tout appareil électronique a tendance à émettre. Il est évident que le filtre doit être transparent à la fréquence d'alimentation (50-60 Hz) pour permettre à l'appareil de fonctionner correctement, tandis qu'il doit agir dans la gamme de fréquences fixée par la norme (150kHz-30MHz).

### 3.5 PROFILAGE DES CONSOMMATIONS

Il existe sur le marché un certain nombre d'appareils qui permettent d'établir le profil de la consommation des utilisateurs, c'est-à-dire de comprendre comment ils utilisent l'électricité pendant une période donnée. Bien entendu, ces systèmes ne permettent pas en soi d'améliorer la consommation d'énergie de l'utilisateur, mais ils ont 2 implications importantes qui permettent d'optimiser la consommation :

- La sensibilisation des utilisateurs à la consommation peut conduire à une plus grande attention et à des économies.

- La mise en place d'un système expert qui analyse ces données et les traite peut conduire à une gestion plus efficace de l'énergie et à des économies substantielles, sans changer les habitudes de consommation.

## 4. ANT

### 4.1 CONSIDÉRATIONS INITIALES

Avant d'entrer dans le bien-fondé du projet, il est bon d'apporter quelques précisions sur les problèmes que nous avons abordés dans les chapitres précédents et sur les solutions actuellement disponibles sur le marché.

Nous avons ensuite examiné les systèmes d'optimisation de la tension. Il en existe plusieurs types sur le marché, bien qu'en pratique il s'agisse de dispositifs qui réduisent simplement la tension du réseau, certains de manière statique, d'autres de manière dynamique, ces derniers incluant les stabilisateurs de tension. Il est clair que dans ce cas, un système d'optimisation de la tension pourrait être utile pour économiser de l'argent, mais il faut faire très attention à la manière dont il fonctionne. L'abaissement statique de la tension n'est certainement pas une solution efficace, car l'augmentation ou l'abaissement de la tension dépend normalement des conditions de charge. Bien entendu, dans ce cas, il faut également faire attention

à l'état de la ligne d'alimentation, qui peut créer des problèmes de fonctionnement ou endommager les charges elles-mêmes. Dans la pratique, une surtension ou une sous-tension stationnaire peut être positive ou négative pour un système selon qu'il s'agit de charges à puissance variable ou de charges à puissance constante (alimentées - non linéaires), pour lesquelles le mode de fonctionnement correct ne peut être prédit a priori.

Nous avons ensuite étudié les systèmes de correction et de filtrage du facteur de puissance. Là encore, de nombreux éclaircissements doivent être apportés en termes d'énergie et de sécurité des installations. En particulier, supposons que nous soyons confrontés au cas d'un système avec une charge inductive à prédominance ohmique et en présence d'une surtension stationnaire, dans ce cas, en fonction du facteur de puissance de la charge, il y aura une chute de tension d'une certaine valeur entre le générateur et la charge elle-même, cette chute de tension pourrait amener la charge à la valeur de tension nominale, l'introduction d'un système de correction et de filtrage du facteur de puissance apporte comme bénéfique une augmentation du facteur de puissance, donc une circulation de courant plus faible dans la branche série du circuit et donc une augmentation de la tension utile à la charge. Cette dernière se traduit très souvent par un gaspillage plus important d'énergie active en fonction du rapport entre l'impédance de la ligne et l'impédance de la charge. Il en va de même, comme nous avons pu le constater dans les simulations, en ce qui concerne la contribution

harmonique aux courants et tensions de ligne, dans ce cas accentuée et aggravée par le fait qu'en présence de perturbations harmoniques se pose également le problème de la sécurité des charges et de l'ensemble du système.

Le projet ANT est né de la nécessité de combiner les contributions positives des différentes technologies examinées en un seul produit. La véritable nouveauté et la valeur ajoutée la plus importante du produit résident précisément dans son approche dynamique de la gestion de la charge. En particulier, l'appareil est capable d'analyser instantanément le réseau électrique auquel il est connecté, tant en termes d'alimentation que de charge, et d'alimenter les charges de manière optimale dans n'importe quelle configuration de fonctionnement. L'appareil est capable d'analyser les paramètres du réseau avec une précision de 0,1 % sur les spectres de tension et de courant et, en analysant le niveau d'émission des charges, il est capable de comprendre la composition interne du réseau et d'interpréter par inférence la contribution des impédances individuelles, avec une référence particulière à la différence entre les impédances de charge et les impédances de transmission et parasites, de sorte que l'appareil est capable d'optimiser le transfert de puissance aux impédances de charge, en minimisant les pertes de transmission et les pertes parasites.

Le projet ANT a été créé pour répondre au besoin croissant d'optimiser le transfert d'énergie entre un générateur électrique et un réseau de charges qui lui sont connectées.

Dans ce contexte, nous entendons par optimisation une série de mesures visant à améliorer la qualité de l'énergie à l'entrée du système et à compenser les effets négatifs dus à l'insertion de charges, comme nous l'avons vu dans les simulations analysées.

Il convient de souligner qu'à l'heure actuelle, tel que le système est composé, il n'existe pas de solutions alternatives équivalentes, mais il existe des produits de substitution qui se rapprochent de la solution proposée.

## 4.2 PROJET ACTUEL / DESCRIPTION DU DISPOSITIF

Système d'adaptation de l'impédance des circuits électriques de consommation à l'impédance du générateur, permettant d'améliorer l'efficacité des installations, de protéger les appareils et d'économiser de l'énergie.

Une fois connecté au réseau électrique, l'appareil est capable d'analyser tous les paramètres de fonctionnement du réseau, qu'il s'agisse de la qualité de l'énergie externe ou des facteurs de perturbation internes. Il peut atténuer les perturbations et utiliser l'énergie pour optimiser la tension et les flux de courant internes. Il est également capable d'équilibrer le profil de charge sur les phases et les tensions d'alimentation, et donc d'équilibrer les 3 courants et les 3 courants de phase. Le profil de fonctionnement est entièrement configurable et peut également être géré à distance, tout comme les données issues de l'analyse du réseau. Le produit comprend la variante de base appelée ANT version 2.1, la variante TG qui inclut les fonctionnalités de gestion à distance de l'appareil, comme mieux spécifié

ci-dessus, et la variante TL qui inclut les fonctionnalités de lecture à distance comme mieux spécifié ci-dessus. Le dispositif doit être raccordé au système, qu'il soit domestique ou professionnel, en aval du compteur et de l'entrée de la ligne de distribution primaire. Une fois connecté au circuit, il est capable de calculer l'impédance perçue par le compteur par rapport au circuit et d'optimiser cette impédance afin d'améliorer le transfert d'énergie entre le compteur et le système, réduisant ainsi efficacement l'énergie dissipée par le système en raison de facteurs qui ne sont pas imputables à l'utilisation des dispositifs eux-mêmes. En outre, l'appareil agit également comme un optimiseur de la qualité de l'énergie par rapport à la ligne d'arrivée. La qualité de l'énergie est la caractéristique du réseau électrique qui permet de transférer efficacement l'énergie aux consommateurs et d'éliminer les déchets autant que possible.

### **Gestion à distance**

Le dispositif télécommandé comprend toutes les fonctionnalités de base avec la possibilité supplémentaire de contrôler à distance tous les appareils installés. La gestion à distance des appareils est très importante pour l'amélioration des paramètres de fonctionnement des appareils, car il est possible de reconfigurer à distance chaque appareil individuel en fonction de la situation de fonctionnement standard. En outre, grâce à la gestion à distance, il est possible d'avoir à tout moment, depuis son propre bureau, une image complète de la situation de fonctionnement

des appareils et, si nécessaire, de contourner chaque appareil en le déconnectant du système auquel il est connecté. En outre, il est possible d'être informé du type de dysfonctionnement qui s'est produit en cas de panne de l'appareil, et si une pièce est cassée à l'intérieur, il est possible de savoir à l'avance quelle pièce doit être remplacée et de fournir un service plus précis et plus efficace, avec naturellement la possibilité de contacter directement le client et de l'informer qu'il y a eu un dysfonctionnement et que le service est en cours d'exécution.

### **Suivi**

Le produit est évidemment équipé d'un réseau de capteurs internes qui vérifie le fonctionnement de tous les composants internes afin de surveiller tous les paramètres de fonctionnement de l'appareil. Il est donc en mesure de signaler immédiatement toute anomalie ou tout dysfonctionnement du système et d'indiquer au service d'assistance le problème rencontré et les solutions possibles à appliquer afin de résoudre rapidement le problème.

### **Logiciel**

D'un point de vue architectural, le produit télégeré consiste en un serveur central dédié qui communique avec tous les appareils de manière à ce que la situation et les paramètres de fonctionnement de tous les appareils connectés soient toujours clairs. En outre, l'entreprise a la possibilité d'accéder à un logiciel et de

vérifier l'état de tous les appareils à tout moment. Il est également possible, par le biais du même logiciel, de modifier la configuration de chaque appareil individuel et, si nécessaire, de le déconnecter du système, le tout de manière simple et rapide. Il est également possible de fournir un logiciel dédié à d'autres utilisateurs qui gèrent des zones individuelles, afin qu'ils puissent gérer tous les appareils de leur zone. Bien entendu, dans chaque cas, l'entreprise et le prestataire de services reçoivent des notifications concernant les éventuels dysfonctionnements des appareils, et éventuellement les tickets de service à traiter.

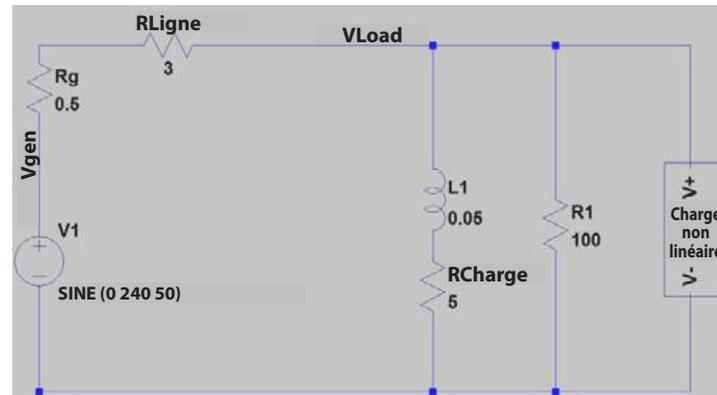
### **Lecture à distance**

Le produit téléporté comprend toutes les fonctionnalités du produit télégré, avec la possibilité de disposer également de toutes les données de consommation de l'utilisateur, le tout sur une plateforme unique, simple et fonctionnelle. Les fonctionnalités de lecture à distance sont accessibles à l'entreprise, elles peuvent également, à la discrétion de l'entreprise, être mises à la disposition du réseau de services, mais surtout elles peuvent être mises à la disposition des utilisateurs individuels qui possèdent l'appareil. Les utilisateurs peuvent accéder facilement à leurs profils de consommation via le site web de l'entreprise et via les smartphones et les tablettes, grâce à une interface simple et intuitive. La grande nouveauté, c'est que grâce au système, il est possible de contrôler non seulement la consommation d'électricité, mais aussi la consommation d'eau et de gaz, et il est même possible de gérer les données de

production de tous les systèmes d'énergie renouvelable de la propriété, tels que les systèmes photovoltaïques, les mini-éoliennes, les systèmes solaires thermiques et autres.

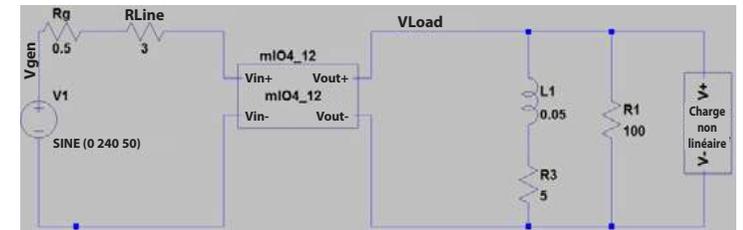
## 4.2 DONNÉES DE CONCEPTION ET SIMULATIONS

Voyons maintenant comment le système interagit avec le système électrique, en simulant une situation réelle, où sont présents des phénomènes de surtension stationnaire, de déphasage et la présence de charges non linéaires. Dans ce cas, comme on peut le voir sur le schéma, on ne tient pas compte de la non-linéarité de la ligne d'alimentation, c'est-à-dire qu'on ne tient pas compte des perturbations provenant de l'extérieur, mais seulement des perturbations générées dans la ligne interne :



Puissance fournie par le générateur : 1094 W

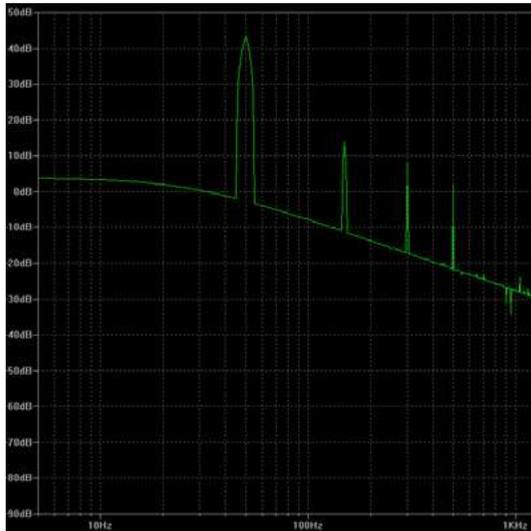
Puissance absorbée par la charge : 738 W



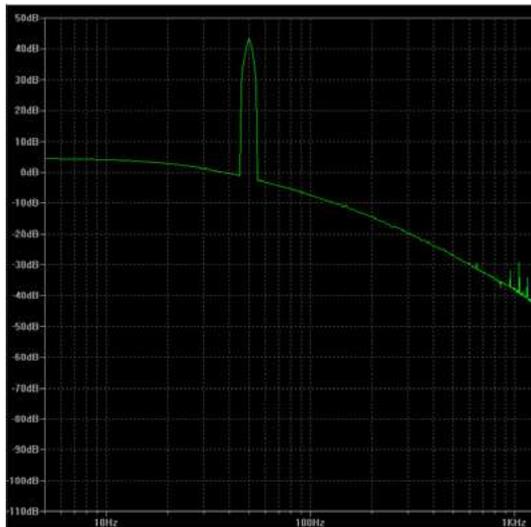
Puissance fournie par le générateur : 843 W

Puissance absorbée par la charge : 756 W

Analyse harmonique sur la tension d'alimentation des charges (VLoad) :

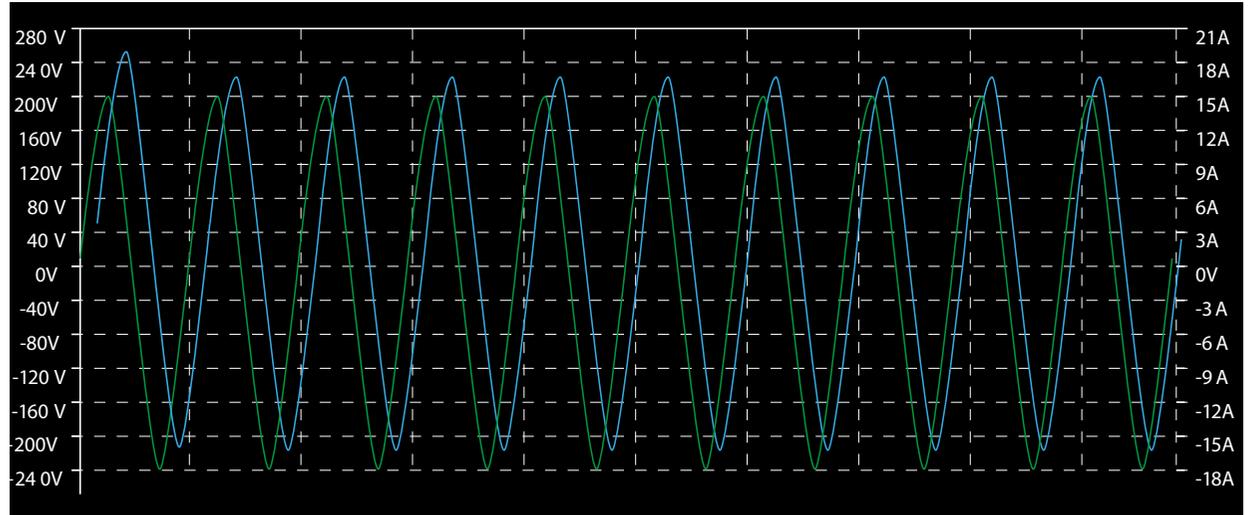


Distorsion harmonique totale : 3.479955 %

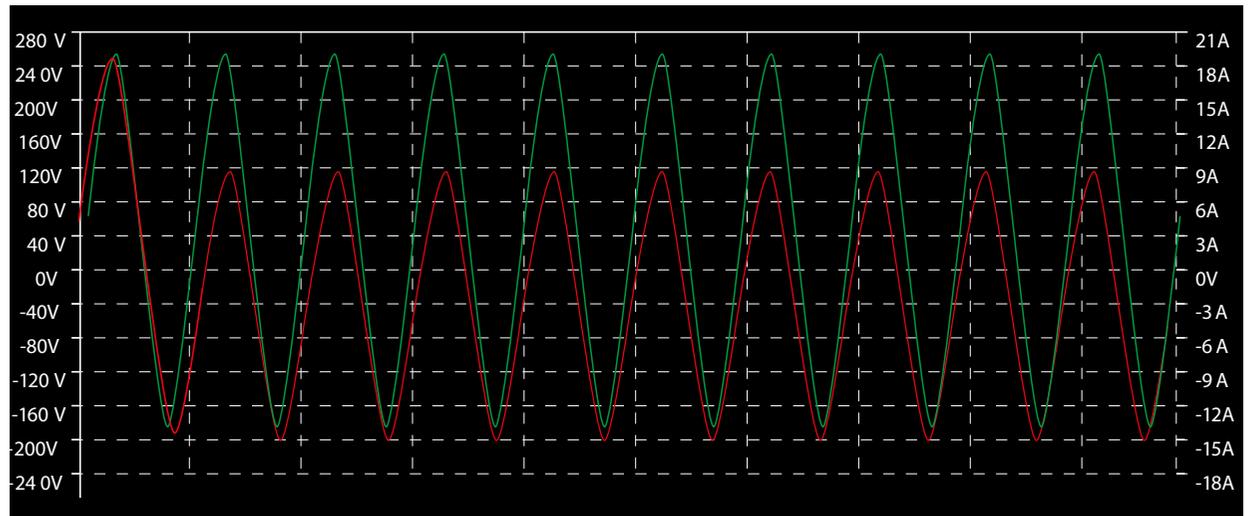


Distorsion harmonique totale : 3.479955 %

Les formes d'onde résultantes :  
Sans ANT :



Avec ANT



## Effets de la mise en place du projet ANT

	Sans ANT	Avec ANT
Tension d'alimentation :	240V	240V
Courant de ligne :	10A	5A
Facteur de puissance :	0.64	0.99
Distorsion harmonique totale :	3.5 %	0.01 %
Puissance active fournie par le générateur :	1094 W	843 W
Puissance active dissipée sur la charge :	738 W	756 W

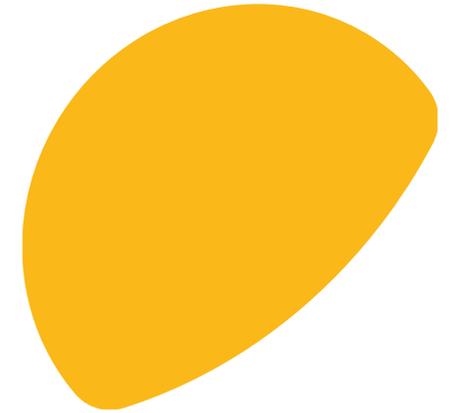
### CONSIDÉRATIONS

- La puissance active distribuée par le générateur sans le système est supérieure à 18 % ;
- L'efficacité de la charge est d'environ 3 % avec l'activation du système
- La distorsion harmonique totale de la tension sur la charge est négligeable lorsque l'appareil est en marche, sinon elle serait d'environ 3,5 %. Ainsi, la charge du système (50 Hz) est optimisée à plus de 3 %.
- Le facteur de puissance du circuit augmente considérablement et se rapproche de l'efficacité maximale autorisée.
- Le courant circulant est inférieur d'environ 50 % après la mise en marche du système et, par conséquent, les pertes sur le câble sont nettement inférieures.

» **Orthographié**  
**ESE, lire EASY,**  
**facile** comment  
économiser de  
l'énergie.



» Découvrez  
l'univers ESE  
et toutes les opportunités  
pour votre entreprise !





*partenaire commercial*



**Innova ICT s.r.l.**  
Via Val di Non, 88  
00144 Rome  
TVA : 01592450629

**Tél. Fax** +39 0884.090204  
**Mobile** +39 340 1238107

**E-mail** [e.innovaict@gmail.com](mailto:e.innovaict@gmail.com)  
**Site Internet** [www.innovaict.net](http://www.innovaict.net)



Scannez le code QR  
et découvrez **ESE.ENERGY**

suivez-nous sur  
 



IoT **INDUSTRY 4.0** Ready  
**MADE IN ITALY**

RAPPORT TECHNIQUE



*divisione efficientamento energetico*



# » SOMMAIRE /

<b>1. SITUATION ACTUELLE DES FOURNITURES</b> .....	<b>4</b>	<b>3. TECHNOLOGIES EXISTANTES</b> .....	<b>18</b>
1.1 LE PASSAGE À L'ÈRE NUMÉRIQUE.....	4	3.1 OPTIMISATION DE LA TENSION.....	18
1.2 LA PRODUCTION DISTRIBUÉE.....	5	3.2 REPHASAGE.....	18
1.3 SURTENSION OU SOUS-TENSION.....	6	3.3 FILTRAGE HARMONIQUE.....	18
1.4 DISTORSION HARMONIQUE.....	7	3.4 FILTRE EMI.....	20
1.5 ÉQUILIBRAGE DES PHASES.....	9	3.5 PROFILAGE DES CONSOMMATIONS.....	20
1.6 DÉPHASAGE.....	10	<b>4. ANT</b> .....	<b>21</b>
<b>2. RÉPONSE DES CHARGES</b> .....	<b>11</b>	4.1 CONSIDÉRATIONS INITIALES.....	21
2.1 AVANT-PROPOS.....	11	4.2 PROJET ACTUEL / DESCRIPTION DU DISPOSITIF.....	22
2.2 SURTENSION STATIONNAIRE SUR CHARGE OHMIQUE.....	12	4.3 DONNÉES DE CONCEPTION ET SIMULATIONS.....	25
2.3 DÉPHASAGE.....	14		
2.4 DISTORSION HARMONIQUE.....	16		



## 1. SITUATION ACTUELLE DES FOURNITURES

Au cours des dernières années, nous avons assisté à 2 phénomènes très importants dans la distribution et l'utilisation de l'électricité au niveau mondial :

- Le passage à l'ère numérique
- La production distribuée

Ces 2 phénomènes ont un impact majeur sur la distribution de l'électricité et sa bonne gestion.

Analysons-les en détail.

### 1.1 LE PASSAGE À L'ÈRE NUMÉRIQUE

Il y a un peu plus d'une décennie, une véritable révolution a commencé dans tous les domaines, en raison de l'utilisation croissante des technologies numériques pour améliorer les performances des systèmes utilisés afin d'exécuter les fonctions technologiques les plus importantes. Les ordinateurs sont aujourd'hui utilisés de manière intensive dans toutes les structures et dans tous les domaines, de l'environnement domestique aux processus industriels les plus complexes. Aujourd'hui, toutes les machines couramment utilisées sont contrôlées et exploitées par des systèmes informatisés entièrement numériques. Mais ce n'est pas tout, des outils qui étaient encore inconcevables il y a quelques années (tablettes, smartphones, etc.) font leur apparition dans nos vies. Même des concepts de

base tels que l'éclairage passent de plus en plus aux technologies numériques, surtout grâce à l'avènement des LED. Nous examinerons plus loin les conséquences de ce phénomène sur les questions énergétiques et la gestion efficace de l'énergie. Pour l'instant, nous constatons que le développement de plus en plus massif des technologies numériques génère la présence de plus en plus importante de charges non linéaires connectées à nos installations.



## 1.2 LA PRODUCTION DISTRIBUÉE

Ces dernières années, surtout en Europe, mais dans le monde entier, la production d'électricité a profondément changé jusqu'à il y a vingt ans, la production d'électricité était considérablement centralisée, surtout grâce à l'exploitation de l'énergie atomique, qui lui a donné le pouvoir. possibilité de créer de grandes centrales électriques pour desservir une base d'utilisateurs de plus en plus nombreuse et énergivore. Toutefois, ces dernières années, la production d'électricité a également connu une révolution remarquable, principalement grâce à l'énergie photovoltaïque, qui, en partie grâce à des politiques d'incitation fortes, s'est de plus en plus imposée dans nos vies, mais aussi grâce à d'autres technologies telles que l'énergie éolienne, l'hydroélectricité, la cogénération, etc. connaissent un développement croissant.

La manière dont ce phénomène affectera la transmission de l'énergie aux utilisateurs finaux dépasse le cadre de cette discussion, mais il peut certainement être intéressant d'évaluer d'abord les principales différences entre les deux approches. Afin de simplifier la discussion, nous esquissons ci-dessous la situation du réseau de transmission de l'énergie électrique dans les deux cas afin d'évaluer qualitativement l'impact de ce changement sur l'utilisateur final :

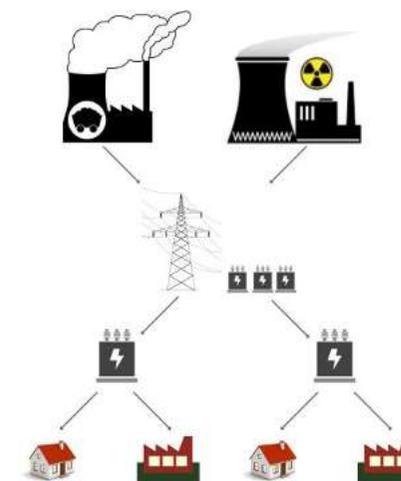


Figure 1 : Réseau de transmission à production centralisée

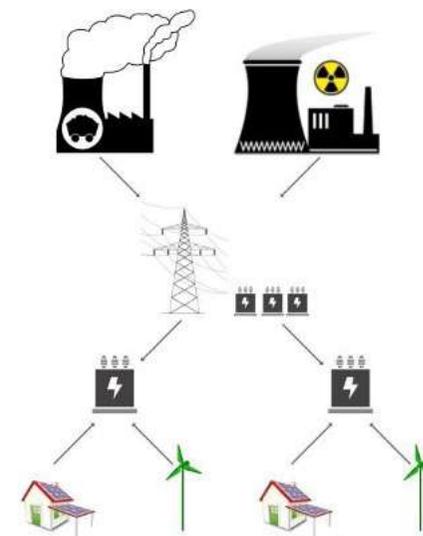


Figure 2 : Réseau de transmission à production décentralisée

Comme le montrent les 2 figures ci-dessus, la différence la plus importante que nous pouvons détecter est d'ordre topologique. En particulier, dans le cas de la production distribuée, l'électricité injectée dans le réseau passe toujours par des systèmes de distribution centraux avant d'arriver aux utilisateurs finaux, alors que dans le cas de la production centralisée, ce n'est pas toujours le cas ; l'électricité peut en somme être échangée directement du générateur à l'utilisateur sans passer par des systèmes de distribution centralisés

Ce phénomène a un impact significatif sur la qualité de l'énergie fournie par les générateurs, puisqu'il n'y a pas d'étapes intermédiaires pour l'équipement de distribution, l'énergie fournie par les générateurs distribués est moins efficace que celle fournie par les générateurs centralisés. Ces dernières années, dans le domaine de l'électricité et de l'électrotechnique, on entend de plus en plus parler de la qualité de l'énergie, c'est-à-dire de la qualité de l'énergie transmise des lignes électriques aux consommateurs.

### 1.3 SURTENSION OU SOUS-TENSION

La surtension est un phénomène par lequel le réseau transfère l'énergie à une tension supérieure à la tension nominale. Le phénomène peut être transitoire ou stationnaire. Dans le premier cas, l'écart par rapport à la valeur nominale se produit pendant quelques instants ou quelques cycles, avec des amplitudes de quelques volts à des centaines de volts, souvent dues à la commutation de charges inductives, de transformateurs

sous charge, etc..., bien sûr, ce type de perturbation peut également générer des inefficacités énergétiques, mais le véritable problème associé à ce type de perturbation est le risque d'endommager les appareils connectés au système. Dans le second cas, la perturbation peut être considérée comme stationnaire lorsque la tension d'alimentation est constamment supérieure à la tension nominale de fonctionnement qui, en Italie, est de 230 V pour les systèmes monophasés à basse tension et de 400 V pour les systèmes triphasés à basse tension. Même dans ce cas, la perturbation pourrait, à long terme, endommager les appareils connectés au système, bien que ce phénomène soit lié à la conception des appareils eux-mêmes, qui devraient avoir une tolérance de tension d'entrée de  $\pm 10\%$  mais le vrai problème est en revanche lié dans de nombreux cas à l'efficacité énergétique qui en résulte. En particulier, pour la plupart des charges linéaires connectées aux réseaux, une augmentation de la tension entraîne une réduction de la durée de vie des appareils et une augmentation de la consommation d'énergie sans amélioration notable des performances.

## 1.4 DISTORSION HARMONIQUE

La transmission de l'énergie sur le réseau électrique doit se faire au moyen d'une onde sinusoïdale à une fréquence de 50 Hz (en Italie) avec une tension nominale de 230 V, et cette onde se fermant sur des impédances linéaires doit générer un courant dans le circuit électrique, également sinusoïdal à une fréquence de 50 Hz, avec une amplitude dépendant de la partie ohmique de l'impédance et au maximum un déphasage par rapport à l'onde de tension dépendant de la partie imaginaire de l'impédance elle-même. Nous avons utilisé le terme « devrait » en référence à la fois à la tension d'entrée et à la génération de courant de ligne, car dans le premier cas, il n'est pas certain que l'onde de tension soit parfaitement sinusoïdale à l'entrée, mais même si elle l'est, il n'est pas certain que l'onde de courant résultante soit parfaitement sinusoïdale. D'un point de vue mathématique, l'onde en question est de toute façon périodique et peut donc être développée en série de Fourier, en la représentant comme la somme d'une infinité de composantes sinusoïdales de fréquence, d'amplitude et de phase différentes. Techniquement, les différentes composantes du développement en série sont appelées harmoniques ; en particulier, l'onde sinusoïdale à la fréquence fondamentale est également une harmonique.

Si l'on considère un circuit électrique alimenté par une onde sinusoïdale pure et fermé uniquement sur des charges linéaires, comme nous venons de le mentionner, l'onde de courant résultante aura une seule

composante à la fréquence de l'alimentation et n'aura pas de composante harmonique à une fréquence autre que la fondamentale, alors que dans le cas où au moins une des charges est non linéaire, des harmoniques de courant à une fréquence autre que la fondamentale peuvent se produire, en négligeant le phénomène des inter-harmoniques pour le moment, pour les charges électriques, les composantes de courant résultantes ayant une plus grande contribution sont généralement celles à des fréquences multiples de la fondamentale, par conséquent les harmoniques produites peuvent être ordonnées numériquement en se référant au multiple de la fréquence d'intérêt, c'est-à-dire par exemple une deuxième harmonique est une harmonique à deux fois la fréquence de la fondamentale. En outre, pour la plupart des charges non linéaires connectées aux réseaux (par exemple, les alimentations à découpage), les harmoniques ayant l'amplitude la plus élevée sont celles d'ordre impair, la troisième, la cinquième, la septième, etc. De plus, dans les cas réels, les harmoniques ont généralement une contribution d'amplitude plus importante dans les nombres ordinaux inférieurs et sont donc décroissantes, c'est-à-dire qu'en général, la troisième harmonique a une amplitude plus importante que la cinquième, la cinquième que la septième, et ainsi de suite. Bien entendu, même dans ce cas, les situations individuelles doivent être analysées car différentes charges non linéaires connectées au réseau en question peuvent générer une contribution harmonique différente l'une de l'autre, et donc la somme de ces contributions peut être différente.

En se référant à l'onde de courant générée, il est possible de définir la distorsion harmonique totale comme suit :

$$THD_i = \frac{I_t - I_f}{I_f} = \frac{\sum_2^{\infty} I_n - I_f}{I_f}$$

où :

$I_t$  est le courant total

$I_f$  est le courant à la fréquence fondamentale

Il en va de même pour l'onde de tension :

$$THD_v = \frac{V_t - V_f}{V_f} = \frac{\sum_2^{\infty} V_n - V_f}{V_f}$$

Et plus généralement pour la puissance transmise :

$$THD_p = \frac{P_t - P_f}{P_f}$$

Cet indice nous renseigne, comme son nom l'indique, sur la distorsion globale présente dans les formes d'onde. Naturellement, plus la valeur est supérieure à 0, plus la forme d'onde s'éloigne du cas idéal. La présence de distorsions harmoniques en soi crée également des problèmes énergétiques dans les installations. Il est en effet possible de démontrer que la distorsion du courant a également un effet sur la forme d'onde de la tension alimentant les charges, et donc que ce phénomène a également des conséquences sur les charges linéaires connectées aux systèmes, et qu'il génère d'autres

pertes dans le système en raison de l'augmentation de la dissipation de puissance sur l'impédance de la ligne et l'impédance interne du générateur.

En général, une charge linéaire a une largeur de bande passante presque infinie, par exemple une ampoule à incandescence transforme toute l'énergie électrique qu'elle fournit en énergie thermique, ce qui signifie que par exemple l'ampoule est alimentée avec 5V à une fréquence de 400 Hz, le filament de l'ampoule va chauffer et de la chaleur sera générée par l'effet Joule.

Le problème est que la transformation en question ne génère pas d'émissions lumineuses dans la bande visible, ou plutôt elle génère une quantité minimale d'émissions lumineuses dans la bande visible et peut-être d'autres émissions dans des bandes lumineuses non visibles à l'œil nu, par exemple l'ultraviolet ou l'infrarouge, parce que le filament est conçu pour fonctionner à la fréquence du réseau.

Cela a 3 implications très importantes :

- Un fonctionnement en dehors des paramètres nominaux peut entraîner une défaillance prématurée de l'appareil.
- L'énergie lumineuse délivrée a une composante indésirable, de sorte que l'on peut dire que l'énergie excédentaire n'est pas utilisée pour effectuer le travail pour lequel l'appareil est conçu, mais qu'elle n'est en fait qu'une perturbation.
- L'émission de rayonnements en dehors de la lumière visible peut être nocive pour le corps humain qui y est exposé.

Si l'on considère d'autres types de charges comme les moteurs électriques, les pompes ou autres, les conséquences pourraient être encore plus graves.

Le résultat général est que ces distorsions transfèrent de l'énergie aux charges, qui l'utilisent en partie pour effectuer le travail pour lequel elles ont été conçues et en partie pour générer des inefficacités qui augmentent la possibilité de défaillance de la charge. Ainsi, outre le préjudice économique résultant de l'augmentation de la consommation d'énergie, il y a également le préjudice lié à la réduction de la durée de vie utile des appareils eux-mêmes.

## 1.5 ÉQUILIBRAGE DES PHASES

Dans le cas des systèmes triphasés, un autre facteur qui contribue négativement à la qualité de l'alimentation est le déséquilibre entre les phases, c'est-à-dire la différence entre les formes d'onde sur les phases individuelles de l'alimentation, ces différences peuvent en général être attribuables à la tension à la fréquence fondamentale ou aux harmoniques. Ces perturbations se produisent généralement lorsque des charges monophasées et des charges triphasées sont mélangées sur la même ligne. Là encore, ce phénomène a des conséquences énergétiques sur les charges triphasées connectées, ainsi que des conséquences en termes d'efficacité et de durée de vie des appareils. La littérature dans ce domaine nous apprend que la plupart des inefficacités sont générées par les moteurs triphasés connectés au système.

## 1.6 DÉPHASAGE

Une autre perturbation importante qui se produit dans les charges connectées à un réseau électrique est le déphasage entre la forme d'onde de la tension et la forme d'onde du courant généré. Le déphasage entre la tension et le courant en général ne génère pas en soi de problèmes énergétiques sur les charges, ou du moins ne génère pas de problèmes en termes d'énergie active absorbée par les charges, bien sûr la présence de déphasage génère des inefficacités et un plus grand engagement de puissance dans la phase de transmission de l'énergie. En général, même une charge linéaire, qui n'est pas complètement ohmique, génère un déphasage du courant par rapport à la tension d'alimentation, soit en avance, soit en retard, selon que la charge en question est ohmique-capacitive ou ohmique-inductive. Cela génère la transmission de la puissance dite réactive, en particulier la puissance réactive est une puissance qui n'est pas utilisée par les charges pour effectuer un travail mais simplement pour supporter le champ magnétique. Le problème, c'est que la puissance réactive est transmise par un courant inductif, ce qui augmente la charge sur les câbles électriques connectés au réseau, et en outre, une plus grande circulation de courant dans le circuit génère des pertes plus importantes sur les impédances en série du circuit lui-même, en particulier sur l'impédance interne du générateur et sur l'impédance de la ligne, générant ainsi des pertes ohmiques (donc de la puissance active) sur le système lui-même.

Ici, 2 facteurs sont importants pour l'équilibre énergétique et économique du système :

- Dans certains cas, l'utilisation de l'énergie réactive génère un coût pour l'utilisateur en termes de pénalités sur la facture.
- Le courant réactif circulant génère une dissipation d'énergie active sur la ligne.

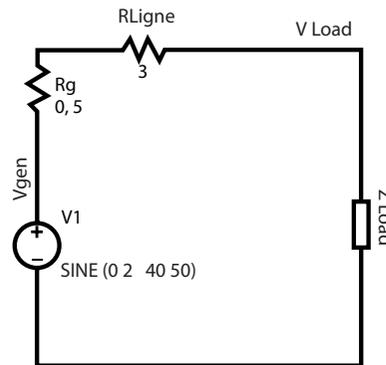
De plus, il est facile de démontrer que ce facteur a également des conséquences sur la tension d'alimentation des charges, car la chute de tension sur la ligne génère une tension utile plus faible sur la charge elle-même pour la même puissance totale absorbée, en d'autres termes, le transport de l'énergie devient très inefficace.

Très souvent, lorsqu'il est question de réseaux électriques, il est d'usage de parler du facteur de puissance, c'est-à-dire du rapport entre la puissance totale transmise (puissance apparente) et la puissance active, et ce facteur est généralement confondu avec ce que l'on appelle le coût. En particulier, cette dernière affirmation n'est vraie que si l'on considère uniquement des charges linéaires, de sorte que pour un réseau de charges linéaires, le coût correspond au facteur de puissance. En général, le facteur de puissance tient également compte de la distorsion harmonique totale.

## 2. RÉPONSE DES CHARGES

### 2.1 AVANT-PROPOS

Dans cette section, nous analyserons, également à l'aide de simulations, le comportement des charges en présence des perturbations susmentionnées. Pour simplifier, prenons l'exemple d'un circuit électrique de type domestique, d'une puissance contractuelle de 3 kW, qui peut être schématisé comme suit : C'est un modèle à paramètres concentrés qui sera utilisé pour les simulations.



*En particulier :*

- $R_g$  est la résistance « interne » du générateur
- $R_{Ligne}$  est la résistance de ligne du réseau, principalement due à la présence de câbles électriques pour la distribution de l'énergie. Pour des raisons de simplicité, les effets capacitifs et

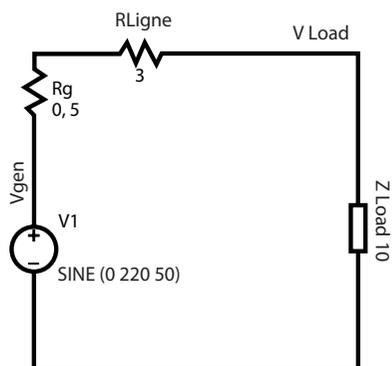
inductifs de l'impédance elle-même seront négligés ; la valeur résistive fixée à 3 Ohm correspond à environ 350 m de câble d'une section moyenne de 2 mm<sup>2</sup>.

- $Z_{Load}$  est l'impédance de charge, schématisée comme l'impédance équivalente vue du générateur. Le circuit considéré peut être divisé en deux sections, l'une étant la partie alimentation et l'autre la partie charges.

Pour évaluer le bilan énergétique du circuit lui-même, nous prendrons en compte un certain nombre de facteurs qui seront utiles de temps à autre, mais en général nous nous concentrerons sur la puissance active fournie par le générateur et la puissance active absorbée par la charge, de sorte que nous puissions évaluer l'efficacité du transfert de puissance dans différentes situations.

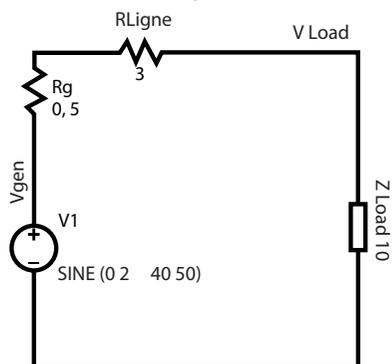
## 2.2 SURTENSION STATIONNAIRE SUR CHARGE OHMIQUE

Considérons comme premier exemple la présence d'une charge purement ohmique et analysons les effets d'une tension d'alimentation supérieure à la tension optimale sur le système, nous supposons une tension optimale de 220V :



Puissance active fournie par le générateur : 1785 W

Puissance active absorbée par la charge : 1322 W



Puissance active fournie par le générateur : 2124 W

Puissance active absorbée par la charge : 1573 W

Pour résumer :

### CHARGE OHMIQUE – EFFETS DES VARIATIONS DE TENSION STATIONNAIRES

	Tension de secteur optimale	Tension de secteur élevée
Tension d'alimentation :	220 V	240V
Courant de ligne :	16.28A	17.73A
Facteur de puissance :	≈ 1	≈ 1
Distorsion harmonique totale :	0 %	0 %
Impédance résistive de la charge :	10 Ohm	10 Ohm
Puissance fournie par le générateur:	1785 W	2124 W
Puissance dissipée sur la charge :	1322 W	1573 W

## Considérations

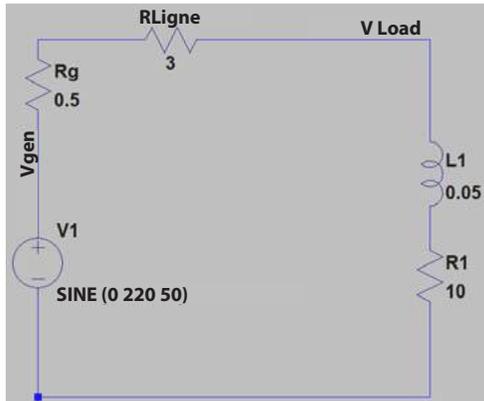
La première considération à faire est que dans le cas présent, la puissance totale engagée par le générateur est inférieure d'environ 16 % dans le cas d'une alimentation optimale. Naturellement, en raison de la linéarité du circuit, la puissance distribuée à la charge est également inférieure de 16 %, mais comme nous l'avons vu en traitant des effets des hautes tensions sur les charges, cela ne se traduit pas toujours par une augmentation de l'efficacité de la charge en question, par exemple s'il s'agit d'une ou plusieurs lampes à incandescence connectées en parallèle, il est certain qu'en les alimentant avec une tension plus élevée à la fréquence fondamentale, on obtiendra une énergie lumineuse plus élevée dans la bande visible, mais on obtiendra également une énergie plus élevée dans les autres bandes d'émission du luminaire, de sorte que la puissance lumineuse globale dans la bande visible ne sera pas augmentée de 16 %, mais d'un pourcentage plus faible. De plus, sortir de la plage de tension optimale pour le luminaire en question revient à raccourcir sa durée de vie de bien plus que 16 % ; des études de la société Omran, dans le cas des lampes à incandescence, montrent qu'alimenter une ampoule à 240V diminue sa durée de vie de 55 % par rapport à l'alimenter à sa tension nominale de fonctionnement.

Un autre facteur à prendre en compte est la perte d'énergie ohmique à travers le réseau, dans le cas de l'alimentation optimale nous avons une perte de  $(1785 - 1322)W = 463W$ , tandis que dans le cas de l'alimentation à plus haute tension nous avons  $(2124 - 1173)W = 551W$ ,

encore une fois, d'un point de vue relatif, le pourcentage de perte est le même, mais en valeur absolue, la perte de puissance est plus importante dans le cas de l'alimentation à plus haute tension, car nous avons environ 100 W de plus dissipés sur la ligne, ce qui signifie plus d'énergie comptabilisée au compteur, et plus de chauffage et d'inefficacité des câbles électriques.

## 2.3 DÉPHASAGE

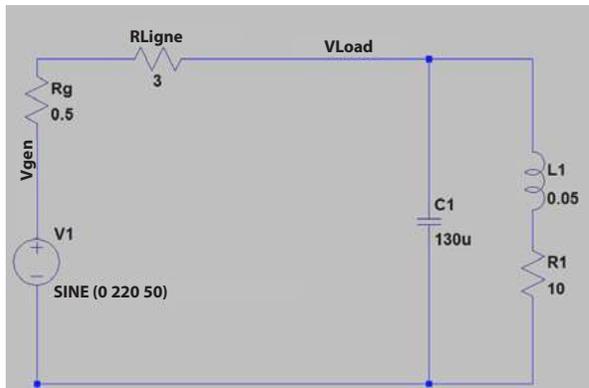
Considérons maintenant la présence d'une charge ohmique inductive dans le circuit :



Puissance fournie par le générateur : 632 W

Puissance absorbée par la charge : 561 W

Nous introduisons en parallèle à la charge une impédance capacitive afin d'obtenir à partir du même circuit une impédance ohmique équivalente vue du générateur :



Puissance fournie par le générateur : 758 W

Puissance absorbée par la charge : 573 W

Pour résumer :

### CHARGE OHMIQUE – EFFETS DES VARIATIONS DE TENSION STATIONNAIRES

	Charge équivalente ohmique	Charge équivalente ohmique-inductive
Tension d'alimentation :	220 V	220 V
Courant de ligne :	5.73A	8.03A
Facteur de puissance :	0.99	0.66
Distorsion harmonique totale :	0 %	0 %
Puissance fournie par le générateur:	758 W	632 W
Puissance dissipée sur la charge :	561 W	573 W

## Considérations

Pour le cas présent, nous pouvons noter 2 considérations importantes :

1. La puissance délivrée par le générateur dans le cas d'une charge ohmique inductive est environ 18 % plus élevée que dans le cas de son équivalent ohmique.
2. La puissance réellement utilisée par la charge est supérieure d'environ 3 %.

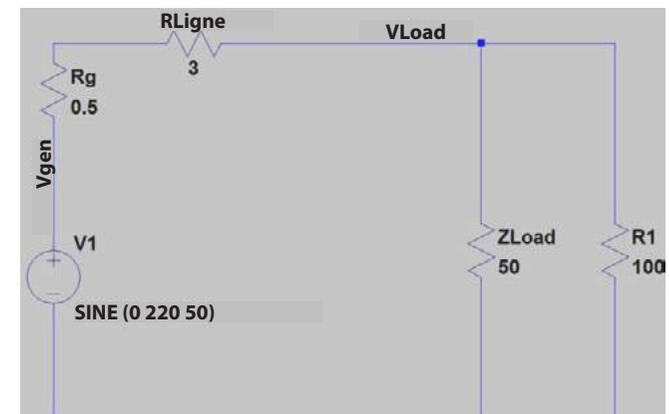
La première affirmation nous permet de dire qu'en améliorant le facteur de puissance du circuit, nous obtenons également une économie significative sur la puissance globale utilisée, de sorte que le bilan énergétique est positif dans ce cas, et nous constatons également que la charge elle-même en bénéficie puisque la puissance qu'elle utilise dans les mêmes conditions est légèrement plus élevée que dans le cas précédent.

Naturellement cette condition est vérifiée avec une tension d'alimentation de 220V, pour des tensions supérieures le problème est plus articulé, car l'insertion de charges inductives génère un déphasage avec une conséquente chute de tension sur la charge due à l'effet de l'impédance de la ligne, naturellement en effectuant le rephasage du système, la situation s'améliore d'un point de vue énergétique, de la même manière que nous venons d'analyser, mais en réalité nous nous retrouvons dans la condition précédente de surtension stationnaire de la charge, donc la dissipation sur la charge doit de

toute façon être remodelée afin de la faire fonctionner dans ses conditions optimales de fonctionnement, ce dernier facteur génère des économies encore plus importantes et est donc un élément souhaitable, que nous traiterons plus tard.

## 2.4 DISTORSION HARMONIQUE

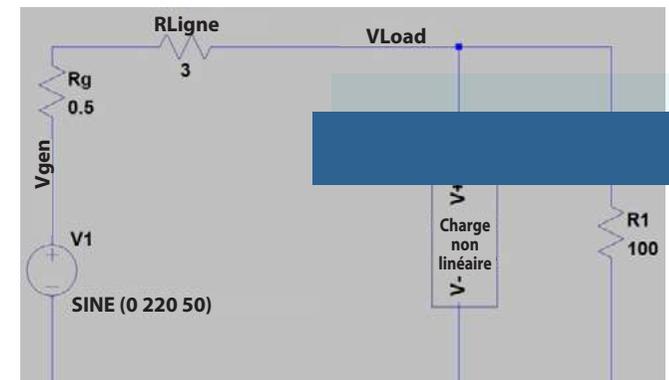
Considérons maintenant la présence de charges mixtes linéaires et non linéaires dans le circuit :



Puissance fournie par le générateur : 654 W

Puissance absorbée par la charge : 592 W

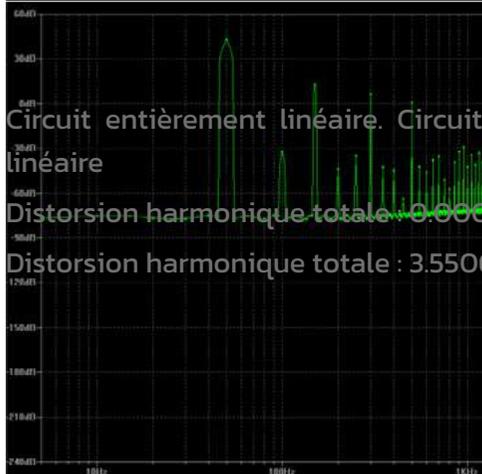
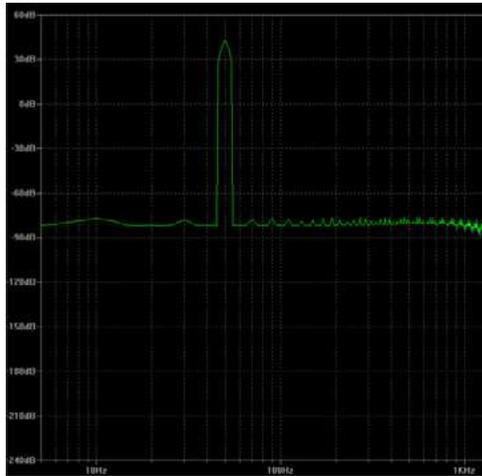
Nous remplaçons la charge de 50 ohms par une charge de même puissance mais non linéaire :



Puissance fournie par le générateur : 656 W

Puissance absorbée par la charge : 586 W

Examinons cette situation en détail, en considérant la transformée de Fourier de la tension sur la charge dans la bande 0 - 1kHz.



Circuit entièrement linéaire. Circuit avec charge non linéaire

Distorsion harmonique totale : 0.000473 %

Distorsion harmonique totale : 3.550619 %

Pour résumer :

CHARGE OHMIQUE INDUCTIVE - EFFETS HARMONIQUES		
	Charge équivalente ohmique	Charge équivalente ohmique-inductive
Tension d'alimentation :	220 V	220 V
Courant de ligne :	4.21A	4.46A
Facteur de puissance :	≈ 1	0.95
Distorsion harmonique totale :	≈ 0 %	3.55 %
Puissance fournie par le générateur:	654 W	656 W
Puissance dissipée sur la charge :	592 W	586 W

## Considérations

Dans le cas présent, 3 considérations peuvent être notées :

- La puissance de sortie du générateur dans le cas d'un circuit non linéaire est environ 0,4 % plus élevée que dans le cas de son équivalent ohmique.
- La puissance totale transmise à la charge est supérieure d'environ 1 %.
- La puissance transmise à la charge à une fréquence de 50 Hz est inférieure de 3,5 %, ce pourcentage étant transmis hors bande.

Dans ce cas, la charge non linéaire génère une circulation de courant avec un contenu harmonique hors bande élevé ; ce courant en lui-même ne génère pas de problèmes pour les autres charges puisqu'il circule uniquement entre le générateur et la charge concernée. Le problème est que la variation de tension sur l'impédance de la ligne a également un contenu harmonique élevé, et donc la tension d'alimentation globale des charges est affectée par des distorsions harmoniques qui dépendent, comme mentionné, de la puissance de la charge déformante et de l'impédance de la ligne, naturellement ces distorsions sont absorbées par les charges ohmiques et transformées en chaleur, sans vraisemblablement aucun avantage en termes d'efficacité, et même avec des inconvénients parfois substantiels en ce qui concerne la durée de vie de l'appareil. Nous pouvons donc affirmer que, si du point de vue du bilan énergétique, il ne semble pas y avoir de grandes variations (1 %), du point de vue de l'efficacité des charges, il y a des variations plus importantes (3-4 %), de sorte que la puissance totale absorbée par la charge est pratiquement inférieure de 5 % si l'on considère la puissance utile pour le travail (celle fournie à 50 Hz).

## 3 TECHNOLOGIES EXISTANTES

### 3.1 OPTIMISATION DE LA TENSION

L'optimisation de la tension est une technique d'économie d'énergie qui consiste à installer un transformateur en série avec la ligne d'alimentation afin de diminuer ou d'augmenter la tension disponible pour la charge.

L'optimisation peut se faire de manière statique ou dynamique, selon que la tension est diminuée de manière fixe d'un certain pourcentage ou qu'elle varie de manière dynamique pendant le fonctionnement normal du circuit.

Normalement, il y a une économie d'énergie, comme nous avons eu l'occasion de l'apprécier dans les simulations précédentes, en présence de charges à prédominance ohmique avec des problèmes de surtension stationnaires, ou en tout cas linéaires, dans le cas de charges non linéaires particulières (telles que comme les alimentations à découpage par exemple) la réduction de tension peut même conduire à des augmentations de consommation, en effet, ces charges fonctionnent à puissance constante, c'est à dire qu'elles absorbent toujours la même quantité d'énergie même face aux variations de tension, donc une tension décroissante cette variation entraîne une augmentation du courant dans le nœud, et donc dans la ligne, ce courant augmente naturellement les pertes sur les câbles de transmission.

## 3.2 REPHASAGE

Le rephasage est toute mesure utilisée pour augmenter (ou, comme on le dit couramment, améliorer) le facteur de puissance ( $\cos \phi$ ) d'une charge donnée, afin de réduire la valeur du courant circulant dans le système avec la même puissance active absorbée. Le but du rephasage est avant tout de diminuer les pertes d'énergie et de réduire l'absorption de puissance apparente en fonction des machines et des lignes existantes sur un site industriel. Le rephasage des installations a pris de l'importance lorsque le distributeur d'électricité a imposé des clauses contractuelles par le biais des mesures tarifaires de la CIP (n° 12/1984 et n° 26/1989) obligeant l'utilisateur à rephaser son installation sous peine de pénalités à payer. Dans les circuits avec des consommateurs particuliers tels que les lampes à filament, les chauffe-eau, certains types de fours, la puissance apparente absorbée est toute la puissance active. Dans les circuits avec des utilisateurs qui ont des enroulements à l'intérieur, comme les moteurs, les soudeurs, les ballasts pour lampes fluorescentes, les transformateurs, une partie de la puissance apparente absorbée est utilisée pour exciter les circuits magnétiques et n'est donc pas utilisée comme puissance active, mais comme puissance généralement appelée puissance réactive. Du point de vue du bilan énergétique global, la correction du facteur de puissance diminue la quantité d'énergie réactive absorbée par le circuit, mais ne diminue pas

directement l'énergie active utilisée, c'est-à-dire que la diminution de l'énergie active est généralement une conséquence du fait que les pertes sur les conducteurs diminuent puisque l'impédance série des conducteurs eux-mêmes est traversée par un courant global plus faible, mais en réalité toute cette énergie active n'est pas économisée, car la dissipation plus faible sur les conducteurs entraîne une chute de tension plus faible sur la charge, et dans le cas de charges ohmiques, cela signifie une plus grande dissipation d'énergie.

Il est clair, cependant, que dans ce cas, l'énergie excédentaire est positive pour la charge, à moins que nous ne soyons dans le cas de surtensions stationnaires. Le rephasage des charges peut être centralisé, distribué ou mixte ; dans le premier cas, l'ensemble du système est rephasé en amont de la charge et en aval du générateur ; par conséquent, à la sortie du générateur, le coût s'améliore, mais il n'y a pas nécessairement d'amélioration dans chaque maillon du circuit ; dans le deuxième cas, les charges sont rephasées individuellement, et l'effet est une amélioration du coût global en aval du générateur ; dans le troisième cas, il existe une solution mixte entre les deux premières. Normalement, le rephasage des charges est obtenu en plaçant un générateur de puissance réactive en parallèle avec les charges elles-mêmes, en contre-phase de la puissance réactive de la charge, de sorte que la puissance réactive de sortie est annulée. Le générateur le plus simple de puissance réactive dans les circuits sinusoïdaux

est le condensateur, de sorte qu'un ou plusieurs condensateurs sont insérés en parallèle avec les charges afin d'obtenir une amélioration des coûts. Il existe cependant d'autres techniques telles que les compensateurs statiques ou les filtres actifs.

### 3.3 FILTRAGE HARMONIQUE

Le filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques se fait normalement en insérant des dispositifs dans le circuit pour diminuer la distorsion harmonique totale normalement dans le courant, afin d'améliorer également les effets de distorsion sur la tension. Il existe 2 grandes catégories de filtres adaptés à cet usage :

- **Filtres passifs**
- **Filtres actifs**

Dans le premier cas, il existe une distinction supplémentaire entre les filtres accordés et les filtres inductifs. Les filtres accordés sont des filtres RLC particuliers accordés sur une fréquence spécifique et généralement connectés à la terre. Dans certains cas, des filtres passe-bande ou passe-haut peuvent également être utilisés afin de créer un chemin à faible impédance vers la terre pour les perturbations à ces fréquences et d'éliminer les perturbations à l'origine.

Dans le cas des inductances de ligne, par contre, le principe est celui des filtres passe-bas LR, en effet l'inductance de ligne forme avec le circuit ohmique en aval un filtre passe-bas qui ne laisse pas passer la puissance à des fréquences loin de 50 Hz. Ce type de solution améliore bien sûr la situation à la charge en atténuant le facteur de distorsion harmonique totale, mais du point de vue du bilan énergétique

la situation reste inchangée ; en effet, les perturbations sont acheminées vers la terre après avoir traversé le compteur, et l'énergie détournée vers la terre est donc toujours comptabilisée. Les filtres actifs sont, du point de vue de la charge, des générateurs de courant parallèles qui injectent un courant égal et opposé à celui de la charge déformante hors bande et annulent ainsi les courants harmoniques générés par les charges elles-mêmes.

Ils travaillent en modulant la tension de ligne, analysent la situation du réseau et injectent les courants de compensation. Naturellement, pour injecter correctement ces courants, ils nécessitent des fréquences de commutation très élevées, supérieures au double de la fréquence harmonique maximale, ils ont donc besoin. Dispositifs internes particulièrement efficaces et rapides, les IGBT sont généralement utilisés pour pouvoir travailler à la fréquence de commutation souhaitée. Cela rend naturellement ces dispositifs particulièrement onéreux. En outre, du point de vue du bilan énergétique, la situation est similaire à celle des filtres passifs, en ce sens qu'en fonction de l'efficacité des filtres  $i$ , une quantité

équivalente d'énergie est absorbée pour compenser les perturbations. Ce qui est intéressant, c'est que les filtres actifs peuvent également améliorer les coûts du système car ils fonctionnent également comme des générateurs de puissance réactive. En outre, un autre aspect très intéressant est que des filtres de capacités différentes peuvent être insérés en parallèle sans perturber le circuit ni risquer la résonance.

### 3.4 FILTRE EMI

Le filtre EMI est un filtre passif que l'on trouve dans la plupart des équipements électroniques et qui permet à ces derniers de se conformer aux réglementations en matière de compatibilité électromagnétique, en particulier celles qui concernent les émissions conduites. Le filtre EMI est en somme un filtre passe-bas qui est connecté comme dernier étage entre l'équipement et l'alimentation, afin d'atténuer les composants de bruit que tout appareil électronique a tendance à émettre. Il est évident que le filtre doit être transparent à la fréquence d'alimentation (50-60 Hz) pour permettre à l'appareil de fonctionner correctement, tandis qu'il doit agir dans la gamme de fréquences fixée par la norme (150kHz-30MHz).

### 3.5 PROFILAGE DES CONSOMMATIONS

Il existe sur le marché un certain nombre d'appareils qui permettent d'établir le profil de la consommation des utilisateurs, c'est-à-dire de comprendre comment ils utilisent l'électricité pendant une période donnée. Bien entendu, ces systèmes ne permettent pas en soi d'améliorer la consommation d'énergie de l'utilisateur, mais ils ont 2 implications importantes qui permettent d'optimiser la consommation :

- La sensibilisation des utilisateurs à la consommation peut conduire à une plus grande attention et à des économies.

- La mise en place d'un système expert qui analyse ces données et les traite peut conduire à une gestion plus efficace de l'énergie et à des économies substantielles, sans changer les habitudes de consommation.

## 4. ANT

### 4.1 CONSIDÉRATIONS INITIALES

Avant d'entrer dans le bien-fondé du projet, il est bon d'apporter quelques précisions sur les problèmes que nous avons abordés dans les chapitres précédents et sur les solutions actuellement disponibles sur le marché.

Nous avons ensuite examiné les systèmes d'optimisation de la tension. Il en existe plusieurs types sur le marché, bien qu'en pratique il s'agisse de dispositifs qui réduisent simplement la tension du réseau, certains de manière statique, d'autres de manière dynamique, ces derniers incluant les stabilisateurs de tension. Il est clair que dans ce cas, un système d'optimisation de la tension pourrait être utile pour économiser de l'argent, mais il faut faire très attention à la manière dont il fonctionne. L'abaissement statique de la tension n'est certainement pas une solution efficace, car l'augmentation ou l'abaissement de la tension dépend normalement des conditions de charge. Bien entendu, dans ce cas, il faut également faire attention

à l'état de la ligne d'alimentation, qui peut créer des problèmes de fonctionnement ou endommager les charges elles-mêmes. Dans la pratique, une surtension ou une sous-tension stationnaire peut être positive ou négative pour un système selon qu'il s'agit de charges à puissance variable ou de charges à puissance constante (alimentées - non linéaires), pour lesquelles le mode de fonctionnement correct ne peut être prédit a priori.

Nous avons ensuite étudié les systèmes de correction et de filtrage du facteur de puissance. Là encore, de nombreux éclaircissements doivent être apportés en termes d'énergie et de sécurité des installations. En particulier, supposons que nous soyons confrontés au cas d'un système avec une charge inductive à prédominance ohmique et en présence d'une surtension stationnaire, dans ce cas, en fonction du facteur de puissance de la charge, il y aura une chute de tension d'une certaine valeur entre le générateur et la charge elle-même, cette chute de tension pourrait amener la charge à la valeur de tension nominale, l'introduction d'un système de correction et de filtrage du facteur de puissance apporte comme bénéfique une augmentation du facteur de puissance, donc une circulation de courant plus faible dans la branche série du circuit et donc une augmentation de la tension utile à la charge. Cette dernière se traduit très souvent par un gaspillage plus important d'énergie active en fonction du rapport entre l'impédance de la ligne et l'impédance de la charge. Il en va de même, comme nous avons pu le constater dans les simulations, en ce qui concerne la contribution

harmonique aux courants et tensions de ligne, dans ce cas accentuée et aggravée par le fait qu'en présence de perturbations harmoniques se pose également le problème de la sécurité des charges et de l'ensemble du système.

Le projet ANT est né de la nécessité de combiner les contributions positives des différentes technologies examinées en un seul produit. La véritable nouveauté et la valeur ajoutée la plus importante du produit résident précisément dans son approche dynamique de la gestion de la charge. En particulier, l'appareil est capable d'analyser instantanément le réseau électrique auquel il est connecté, tant en termes d'alimentation que de charge, et d'alimenter les charges de manière optimale dans n'importe quelle configuration de fonctionnement. L'appareil est capable d'analyser les paramètres du réseau avec une précision de 0,1 % sur les spectres de tension et de courant et, en analysant le niveau d'émission des charges, il est capable de comprendre la composition interne du réseau et d'interpréter par inférence la contribution des impédances individuelles, avec une référence particulière à la différence entre les impédances de charge et les impédances de transmission et parasites, de sorte que l'appareil est capable d'optimiser le transfert de puissance aux impédances de charge, en minimisant les pertes de transmission et les pertes parasites.

Le projet ANT a été créé pour répondre au besoin croissant d'optimiser le transfert d'énergie entre un générateur électrique et un réseau de charges qui lui sont connectées.

Dans ce contexte, nous entendons par optimisation une série de mesures visant à améliorer la qualité de l'énergie à l'entrée du système et à compenser les effets négatifs dus à l'insertion de charges, comme nous l'avons vu dans les simulations analysées.

Il convient de souligner qu'à l'heure actuelle, tel que le système est composé, il n'existe pas de solutions alternatives équivalentes, mais il existe des produits de substitution qui se rapprochent de la solution proposée.

## 4.2 PROJET ACTUEL / DESCRIPTION DU DISPOSITIF

Système d'adaptation de l'impédance des circuits électriques de consommation à l'impédance du générateur, permettant d'améliorer l'efficacité des installations, de protéger les appareils et d'économiser de l'énergie.

Une fois connecté au réseau électrique, l'appareil est capable d'analyser tous les paramètres de fonctionnement du réseau, qu'il s'agisse de la qualité de l'énergie externe ou des facteurs de perturbation internes. Il peut atténuer les perturbations et utiliser l'énergie pour optimiser la tension et les flux de courant internes. Il est également capable d'équilibrer le profil de charge sur les phases et les tensions d'alimentation, et donc d'équilibrer les 3 courants et les 3 courants de phase. Le profil de fonctionnement est entièrement configurable et peut également être géré à distance, tout comme les données issues de l'analyse du réseau. Le produit comprend la variante de base appelée ANT version 2.1, la variante TG qui inclut les fonctionnalités de gestion à distance de l'appareil, comme mieux spécifié

ci-dessus, et la variante TL qui inclut les fonctionnalités de lecture à distance comme mieux spécifié ci-dessus. Le dispositif doit être raccordé au système, qu'il soit domestique ou professionnel, en aval du compteur et de l'entrée de la ligne de distribution primaire. Une fois connecté au circuit, il est capable de calculer l'impédance perçue par le compteur par rapport au circuit et d'optimiser cette impédance afin d'améliorer le transfert d'énergie entre le compteur et le système, réduisant ainsi efficacement l'énergie dissipée par le système en raison de facteurs qui ne sont pas imputables à l'utilisation des dispositifs eux-mêmes. En outre, l'appareil agit également comme un optimiseur de la qualité de l'énergie par rapport à la ligne d'arrivée. La qualité de l'énergie est la caractéristique du réseau électrique qui permet de transférer efficacement l'énergie aux consommateurs et d'éliminer les déchets autant que possible.

### **Gestion à distance**

Le dispositif télécommandé comprend toutes les fonctionnalités de base avec la possibilité supplémentaire de contrôler à distance tous les appareils installés. La gestion à distance des appareils est très importante pour l'amélioration des paramètres de fonctionnement des appareils, car il est possible de reconfigurer à distance chaque appareil individuel en fonction de la situation de fonctionnement standard. En outre, grâce à la gestion à distance, il est possible d'avoir à tout moment, depuis son propre bureau, une image complète de la situation de fonctionnement

des appareils et, si nécessaire, de contourner chaque appareil en le déconnectant du système auquel il est connecté. En outre, il est possible d'être informé du type de dysfonctionnement qui s'est produit en cas de panne de l'appareil, et si une pièce est cassée à l'intérieur, il est possible de savoir à l'avance quelle pièce doit être remplacée et de fournir un service plus précis et plus efficace, avec naturellement la possibilité de contacter directement le client et de l'informer qu'il y a eu un dysfonctionnement et que le service est en cours d'exécution.

### **Suivi**

Le produit est évidemment équipé d'un réseau de capteurs internes qui vérifie le fonctionnement de tous les composants internes afin de surveiller tous les paramètres de fonctionnement de l'appareil. Il est donc en mesure de signaler immédiatement toute anomalie ou tout dysfonctionnement du système et d'indiquer au service d'assistance le problème rencontré et les solutions possibles à appliquer afin de résoudre rapidement le problème.

### **Logiciel**

D'un point de vue architectural, le produit télégeré consiste en un serveur central dédié qui communique avec tous les appareils de manière à ce que la situation et les paramètres de fonctionnement de tous les appareils connectés soient toujours clairs. En outre, l'entreprise a la possibilité d'accéder à un logiciel et de

vérifier l'état de tous les appareils à tout moment. Il est également possible, par le biais du même logiciel, de modifier la configuration de chaque appareil individuel et, si nécessaire, de le déconnecter du système, le tout de manière simple et rapide. Il est également possible de fournir un logiciel dédié à d'autres utilisateurs qui gèrent des zones individuelles, afin qu'ils puissent gérer tous les appareils de leur zone. Bien entendu, dans chaque cas, l'entreprise et le prestataire de services reçoivent des notifications concernant les éventuels dysfonctionnements des appareils, et éventuellement les tickets de service à traiter.

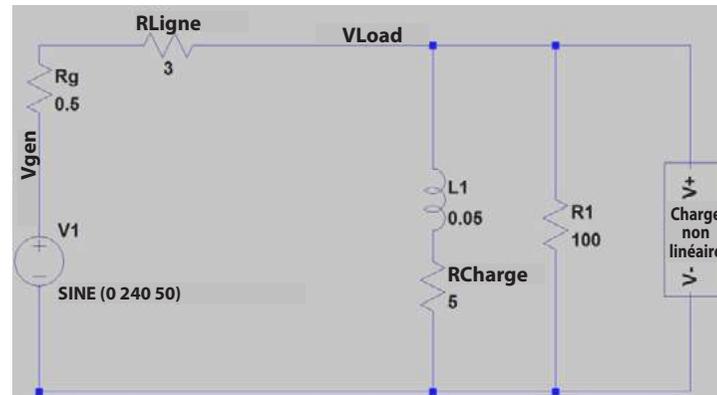
### **Lecture à distance**

Le produit téléporté comprend toutes les fonctionnalités du produit télégréé, avec la possibilité de disposer également de toutes les données de consommation de l'utilisateur, le tout sur une plateforme unique, simple et fonctionnelle. Les fonctionnalités de lecture à distance sont accessibles à l'entreprise, elles peuvent également, à la discrétion de l'entreprise, être mises à la disposition du réseau de services, mais surtout elles peuvent être mises à la disposition des utilisateurs individuels qui possèdent l'appareil. Les utilisateurs peuvent accéder facilement à leurs profils de consommation via le site web de l'entreprise et via les smartphones et les tablettes, grâce à une interface simple et intuitive. La grande nouveauté, c'est que grâce au système, il est possible de contrôler non seulement la consommation d'électricité, mais aussi la consommation d'eau et de gaz, et il est même possible de gérer les données de

production de tous les systèmes d'énergie renouvelable de la propriété, tels que les systèmes photovoltaïques, les mini-éoliennes, les systèmes solaires thermiques et autres.

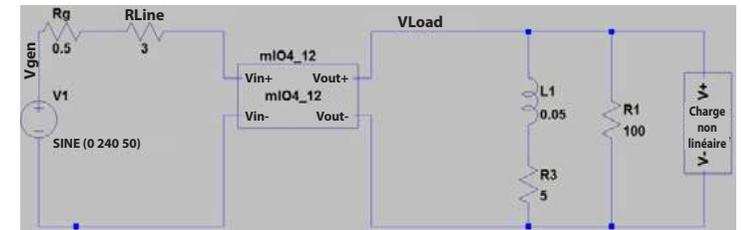
## 4.2 DONNÉES DE CONCEPTION ET SIMULATIONS

Voyons maintenant comment le système interagit avec le système électrique, en simulant une situation réelle, où sont présents des phénomènes de surtension stationnaire, de déphasage et la présence de charges non linéaires. Dans ce cas, comme on peut le voir sur le schéma, on ne tient pas compte de la non-linéarité de la ligne d'alimentation, c'est-à-dire qu'on ne tient pas compte des perturbations provenant de l'extérieur, mais seulement des perturbations générées dans la ligne interne :



Puissance fournie par le générateur : 1094 W

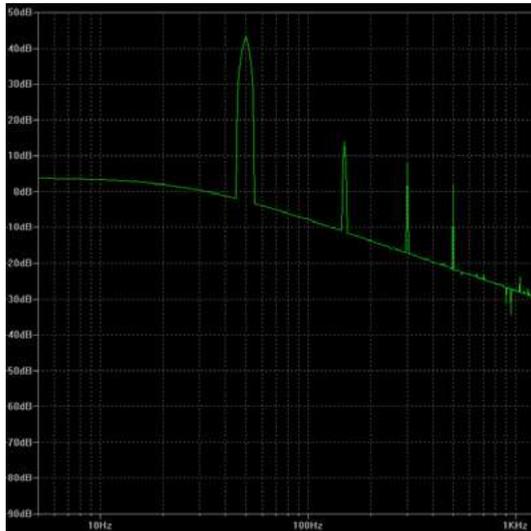
Puissance absorbée par la charge : 738 W



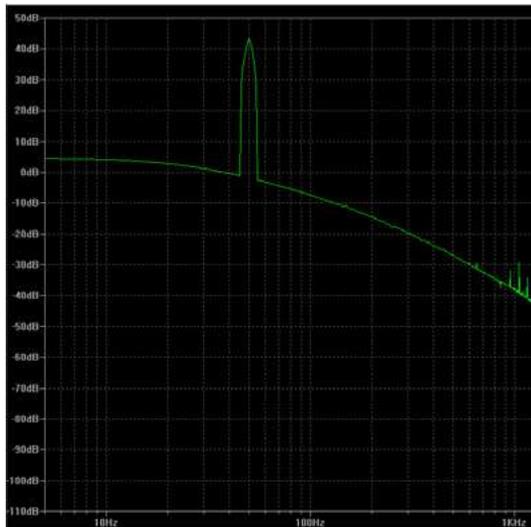
Puissance fournie par le générateur : 843 W

Puissance absorbée par la charge : 756 W

Analyse harmonique sur la tension d'alimentation des charges (VLoad) :

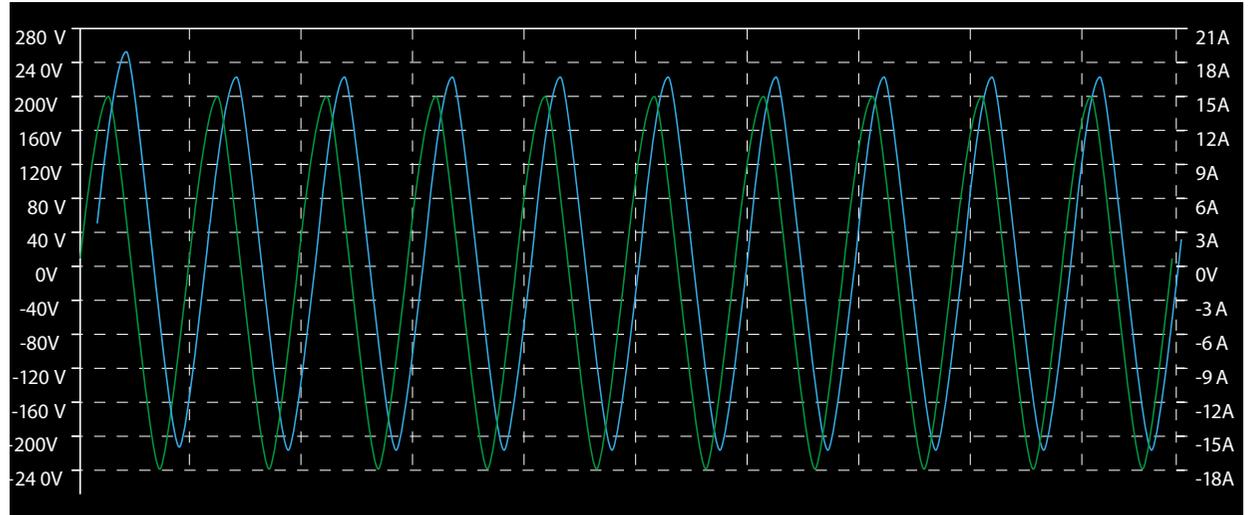


Distorsion harmonique totale : 3.479955 %

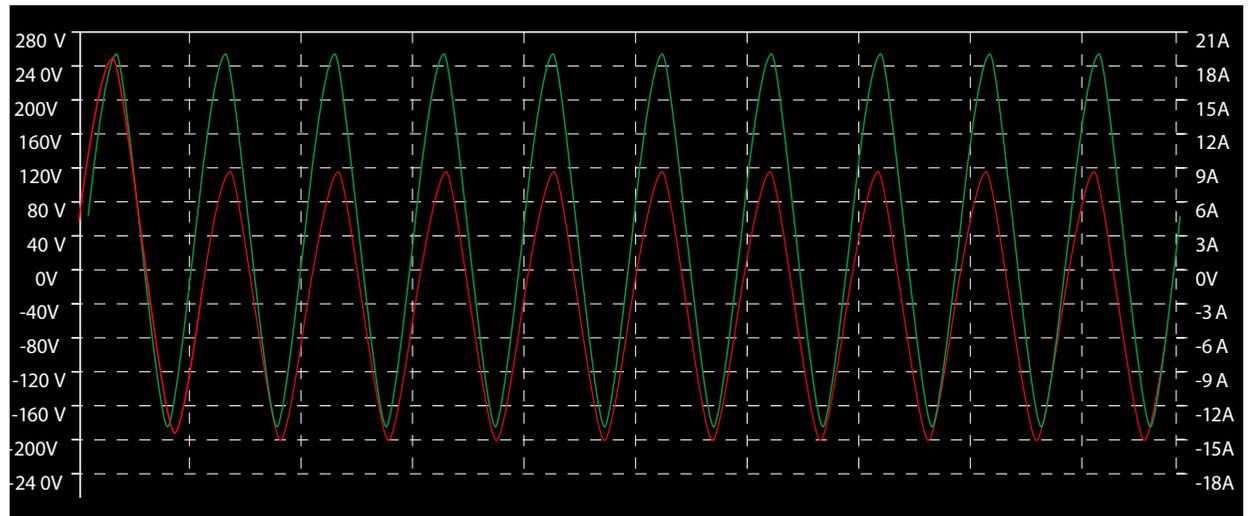


Distorsion harmonique totale : 3.479955 %

Les formes d'onde résultantes :  
Sans ANT :



Avec ANT



## Effets de la mise en place du projet ANT

	Sans ANT	Avec ANT
Tension d'alimentation :	240V	240V
Courant de ligne :	10A	5A
Facteur de puissance :	0.64	0.99
Distorsion harmonique totale :	3.5 %	0.01 %
Puissance active fournie par le générateur :	1094 W	843 W
Puissance active dissipée sur la charge :	738 W	756 W

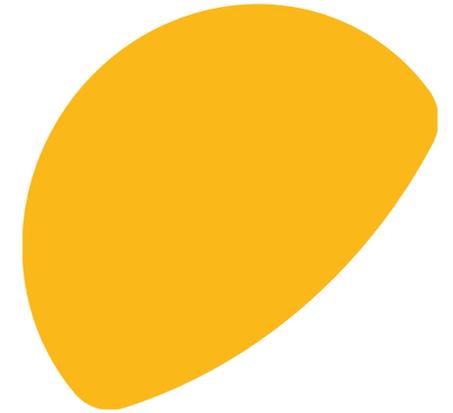
### CONSIDÉRATIONS

- La puissance active distribuée par le générateur sans le système est supérieure à 18 % ;
- L'efficacité de la charge est d'environ 3 % avec l'activation du système
- La distorsion harmonique totale de la tension sur la charge est négligeable lorsque l'appareil est en marche, sinon elle serait d'environ 3,5 %. Ainsi, la charge du système (50 Hz) est optimisée à plus de 3 %.
- Le facteur de puissance du circuit augmente considérablement et se rapproche de l'efficacité maximale autorisée.
- Le courant circulant est inférieur d'environ 50 % après la mise en marche du système et, par conséquent, les pertes sur le câble sont nettement inférieures.

» **Orthographié**  
**ESE, lire EASY,**  
**facile** comment  
économiser de  
l'énergie.



» Découvrez  
l'univers ESE  
et toutes les opportunités  
pour votre entreprise !





***Siège social***  
Corso Giuseppe Garibaldi 86  
20121 - Milan (MI) Italie

***Siège administratif***  
Via San Martino, 87  
Parco dei Ciliegi  
82016 Montesarchio (BN) Italie

+39 02 87.368.229  
+39 02 87.368.222  
  
info@ese.energy  
assistance technique  
service@ese.  
energy Code fiscal et  
N° TVA :

08999150967  
R.E.A. : MI2061570

[www.ese.energy](http://www.ese.energy)  
suivez-nous sur  



Scannez le code QR  
et découvrez **ESE.ENERGY**